

Eye movement tracking type  
wide-angle high-resolution image display system

視線追従型広視野高解像度  
映像提示システムの研究

岩本 和世  
Kazuyo IWAMOTO

視線追従型広視野高解像度  
映像提示システムの研究

岩 本 和 世

## ABSTRACT

This paper describes image display system that can display wide-angle images at high-resolutions using human eye characteristics while making use of conventional displays. When the robot is operated remotely, the operator cannot obtain information on the remote environment directly. Therefore, the operator should obtain information on the remote environment with some sense presentation devices which present the image, force, and the sound, etc. In these sense presentation devices, especially, the visual display plays an important role because it can provide the large quantity of information of the object in the remote environment. Moreover, the presentation of the images has a large influence on the efficiency of the operator's task. High-resolution, wide-angle images are necessary for improving the reality of the presentation. However, the image size presented by a conventional display device is much smaller than the field of human vision. If a wide-angle view is presented using a conventional display device, the resolution will be decreased as a result. For instance, when an image with a viewing angle of 100 degrees is presented on an NTSC display (525 scanning lines), the resolution is less than Landolt eyesight 0.1. Even if a high-definition television display (HDTV, 1125 scanning lines) is used, the resolution is still less than Landolt eyesight 0.2. To resolve this problem, we proposed an image capture / display system. The principle is that a small high-resolution image is presented at the viewpoint by detecting eye movement and a wide-angle low-resolution image is presented in the peripheral area using two displays. Humans can see an object at high-resolution only near the viewpoint. Therefore, the operator can feel that the displayed image is a wide-angle, high-resolution image.

In order to realize such an image display system, there are many subjects, which should be solved. It is necessary to obtain the human eye characteristics which are required to design the system by evaluation experiment using some subjects. Based on these results, we have to consider the composition of the wide-angle, high-resolution image capturing and the display system. It is necessary to design and make a trial system, to confirm fundamental effectiveness by the evaluation experiment.

In this paper, first, how to design the size of the high-resolution area in the image display system is provided. Second, we discuss about the display method of high-resolution image for image display system utilizing the characteristics of the human eye. Some evaluation experiments for display time delay of high-resolution image are introduced using computer graphics. Then, how to design the optical system is discussed and a proto-type image display system is explained. Finally, an image capture system is designed and it is integrated with the image display system. Some evaluation experiments using an integrated system are introduced to demonstrate the effectiveness of the proposed idea.

Key words: Human Interface, Tele-operation, Head Mounted Display, Tele-robotics

## 視線追従型広視野高解像度映像提示システムの研究

### 目 次

#### Abstract

第 1 章 緒論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 従来の広視野高解像度映像提示技術の概要と問題点	2
1.2.1 広視野高解像度映像提示の形態	2
1.2.2 広視野高解像度映像提示の手段	2
1.3 視線追従型広視野高解像度映像提示技術	3
1.3.1 視線追従型映像提示の概念	3
1.3.2 類似の研究の概要と課題	4
1.3.3 その他の関連する研究について	5
1.4 本研究のアプローチおよび課題	5
1.5 論文の構成	6
第 2 章 注視点近傍における静的視覚特性の検討	7
2.1 緒言	7
2.2 実験装置	7
2.3 実験方法	8
2.4 実験結果と考察	11
2.5 結言	14
第 3 章 注視点近傍における動的視覚特性の検討	15
3.1 緒言	15
3.2 映像提示評価実験システム	15
3.2.1 システムの構成	15
3.2.2 視線検出方法とセンサ	16
3.2.3 画像提示タイミング検出センサ	16
3.3 実験方法	16
3.3.1 実験条件	16
3.3.2 実験手順	18
3.4 実験結果	19
3.5 結言	21
第 4 章 映像提示システムの開発	22
4.1 緒言	22
4.2 方式の検討	22
4.2.1 プリズム方式	22
4.2.2 楕円鏡方式	22
4.2.3 前方投射方式	23
4.2.4 各方式の検討	23
4.3 試作システムの構成	24
4.4 評価実験	27
4.4.1 ミラー追従特性の評価	27

4.4.2	高解像度映像制御系の評価	28
4.4.2.1	実験方法	28
4.4.2.2	実験結果と評価	28
4.5	結言	29
第5章	映像撮像・提示システムの統合	30
5.1	緒言	30
5.2	視線追従型映像撮像・提示システム	30
5.2.1	システム光学系の2次元化	30
5.2.1.1	システム構成の検討	30
5.2.1.2	映像提示システム	31
5.2.1.3	撮像システム	31
5.2.2	軸別制御方式の特性	32
5.2.3	視線検出の原理	32
5.2.4	制御システムの構成	33
5.2.5	試作システムの仕様	33
5.3	高解像度映像の提示条件と評価実験	34
5.3.1	高解像度映像の提示条件	34
5.3.2	実験方法	34
5.3.3	実験結果	36
5.4	結言	37
第6章	視線追従型映像提示システムの設計指針	39
6.1	緒言	39
6.2	画角と解像度	39
6.3	伝送容量について	40
6.4	高解像度映像の視線追従	40
6.5	周辺視と境界の認識	41
6.6	視線検出のタイミング	42
6.7	高解像度映像の移動と提示方法	43
6.8	結言	43
第7章	結論	44
7.1	研究の総括	44
7.2	今後の課題	45
7.2.1	広視野と高解像度の境界について	45
7.2.2	映像品質について	46
7.3	将来展望	46
7.4	まとめ	46
	謝辞	47
	参考文献	48
	関連発表リスト	50
	付録 A	53
	付録 B	54
	付録 C	56
	付録 D	58

# 第 1 章 緒 論

## 1.1 研究の背景

安全な遠隔地からロボットを操作する遠隔制御法は、ロボットの制御手法のひとつとして早期より研究開発されてきている[1][2]. Fig.1.1 に示すような遠隔操作では、オペレータは直接状況を把握できないが、インターフェイス装置から視覚、聴覚、触覚、力覚など、さまざまな情報が提示される。この手法を有効に機能させるためには、バイラテラル制御などのロボット自体の制御技術とともに、遠隔地の状況を臨場感高く操作者に提示することが不可欠である。このような、機械からオペレータへの感覚フィードバックを臨場感の高いものとするための研究は、テレイグジスタンス (telexistence) とよばれている[3][4][5]. 理想的にはすべての感覚に対して遠隔地の情報が忠実に提示される必要があるが、現状の遠隔操作技術では、単純な作業であっても、直接操作するのにならば、作業効率は著しく低下することが指摘されている [6]. それは、オペレータに提供される情報量が非常に少ないことが一因と考えられ、情報量が増えれば作業効率は改善すると思われる。そのためには、最も多くの情報を提供できる視覚映像の臨場感を高めることは不可欠であり、包囲型ディスプレイ等の大型ディスプレイやヘッドトラッキング

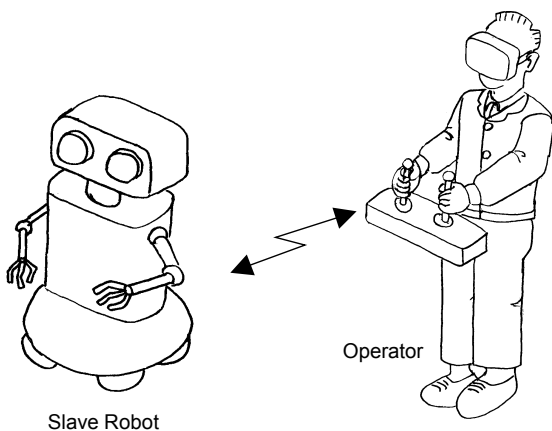


Fig.1.1 Concept of tele-existence

付きヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いた方式等が高い臨場感を実現すべく、研究開発されている。臨場感を高めるには広視野で高解像度の映像提示が必要であるが、もし映像提示システムにおいて、その提示映像の大きさが小さいと視野を覆うに十分大きな像が提示できず、その映像表示面の枠が視界に入り臨場感が損なわれる。そこで、視野を十分カバーできる映像を提示する必要があるが、Fig.1.2 に示すように、通常のディスプレイデバイスがもつ走査線数は一般に限られており、人間の視覚の分解能と比べて十分とはいえず、大画面にすると提示画像の分解能が落ち臨場感の高い像が必ずしも提示できない。高い臨場感を感じる画角について様々な研究があり、たとえば人間は提示映像の画角が 60 度を越えると高い臨場感を感じ、無理な探索動作なしで情報受容が可能な範囲は水平方向で 90 度とされ[7], また十分な臨場感を得るには 110 度程度必要とする報告もある[8]. そこで例えば、NTSC ディスプレイデバイス (実際の走査線数は約 480 本だが本論文では規格の 525 本として扱う) を用いて 100 度の映像を提示することを考えると、Fig.1.3 に示すようにその走査線 1 本の幅は視力検査で用いられるランドルト環の視力 0.1 相当の切り欠きの幅より太くなる程度にまで解像度が低下する。(換算視力については付録 A 参照) また高品位ディスプレイ (HDTV 走査線数 1125 本) を用いたとしても、視野角 100

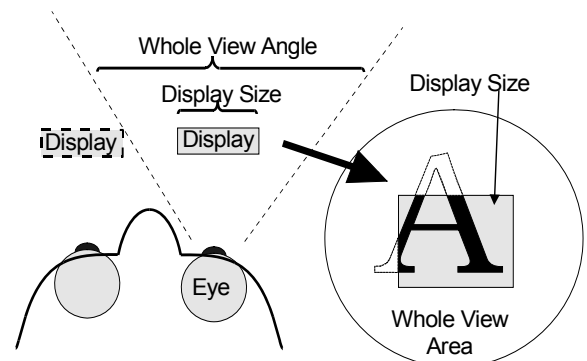
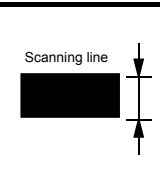
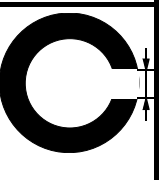
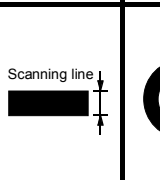
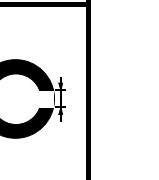


Fig.1.2 Conventional display device

NTSC (525 scanning lines) eye sight 0.09	Landolt eye sight 0.1	HDTV (1125 scanning lines) eye sight 0.19	Landolt eye sight 0.2
			

**Fig.1.3** Relation between view angle and resolution  
(Wide view image of 100 degrees is presented)

度の映像を提示すると、その走査線 1 本の幅はランドルト環の視力 0.2 相当の切り欠きの幅より太くなる程度の解像度となる。そのため、解像度を維持しつつ、人の視野をカバーするに十分な映像を提示する映像提示システムを構成することが難しく、通常のディスプレイデバイスでは、必要な解像度を確保するために、視野角を制限せざるを得ない。このことが現実感の高い映像を提示する上で一つの障害となっている。

また遠隔操作においては、周囲の物体の位置認識、異常検出など周囲の状況の把握のために広視野である必要があるし、手元の作業を正確にすばやく行ったり、メーターの数値を読んだりするために高解像度であることは非常に重要であり、提示映像の臨場感の高さは作業効率にも影響すると考えられる。

## 1.2 従来の広視野高解像度映像提示技術の概要と問題点[9,10]

広視野高解像度映像提示技術におけるその実現形態と手段の現状についてそれらの特徴や問題点を中心に述べる。

### 1.2.1 広視野高解像度映像提示の形態

広視野高解像度を実現するための映像提示システムの形態としては、以下のように大別できる。

#### 1. 大型のプロジェクタあるいは大型の CRT ディス

プレイなどによる映像提示[11-16]

広視野高解像度の映像提示を実現する最も直接的方法であり、システムは大きくなるが、広視野高解像度の実現は比較的容易で、映画、絵画の鑑賞などの用途にも適用できる。またより大規模なシステムでは、CAVE や CABIN などの人をスクリーンで包囲するタイプのものもある。

#### 2. ヘッドマウントディスプレイ型[17-28]

小型にでき、持ち運びは容易。映像撮像システムが頭部の動きと連動できるようになっている場合、見回し動作に伴う時間遅れの問題はあるものの、頭部を動かせば全方向の映像を見ることができ、一般的に小型になるほどシステムを構成するデバイスの解像度が低下するため広視野高解像度の実現は難しい。また装着がわずらわしいなどの問題もある。全方向の映像生成が可能な VR などのコンピュータグラフィックス映像の提示などによく用いられる。

#### 3. 携帯型

持ち運びが容易で卓上や床上に設置して使用できる。システムの大きさ、映像の品質は、スクリーン投影型とヘッドマウントディスプレイ型の間位置するものといえる。スタンドアロンのものがロボット手術などで使用されている例がある。ヘッドマウントディスプレイ型よりもサイズの大きい高解像度のデバイスが使用できるため、より広視野高解像度の映像が提示できる。遠隔視覚検査などに用いることを考えると、インフラが十分に整備されていないところでも、その現場近くに持ち運んで操作でき、かつ広視野高解像度映像の提示ができるこのタイプが適していると思われる。

### 1.2.2 広視野高解像度映像提示の手段

そして、前節で述べた映像提示形態について広視野高解像度を実現する手段としては、以下のようなものが考えられる。

#### 1. ディスプレイに HDTV など高解像度デバイスを用いる方法

デバイスが開発されれば、最も直接的な方法であり、システムの構成を単純にできる。しかし前述のように、HDTV 方式のディスプレイを用いても、広視野高解像度映像提示の実現には不十分である。一般的には、大型のディスプレイシステム

ほど高解像度のデバイスが使用できる。今後もより高解像度なデバイスの開発は行われると考えられるが、将来的にどの程度まで高解像度化が進むのかは不透明な部分もある。

2. ディスプレイまたはプロジェクタを並べて配置する方法。

NTSC 規格のデバイスでも広視野高解像度が実現できる。問題はディスプレイデバイスのつなぎ目の枠が気になる点である。撮像システム側の設計にも工夫が必要で、たとえば、複数台のカメラを格子状に並べて撮像システムを構成する場合、ズームなどの時に全カメラの方向を制御する必要がある。

### 1.3 視線追従型広視野高解像度映像提示技術

前述で述べたように、従来技術ではより広視野高解像度の映像提示を実現するためには、どうしてもシステムのサイズが大きくなる傾向にある。仮に、HDTV を用いたとしても、前述のように人に十分な臨場感を与える広視野で高解像度の映像提示は困難であり、また高品位ディスプレイよりも高解像度のディスプレイデバイスの開発にはかなり時間を要することを前提とすれば、別の広視野高解像度映像提示方式が検討される必要がある。遠隔視覚検査での適用を考えると、広視野高解像度映像提示が可能でありながら、システムのサイズはより小さく、かつまた映像の伝送量も少ないほうが望ましい。

そこでこれらの問題を解決しつつ、かつ広視野高解像度映像を提示する手段として、前節述べたのと異なる手段で実現する方法が提案されている。それは、人の視覚系が持つ生理学的特性を利用した映像提示法であり、注視点付近に小領域高解像度映像を、そしてその周囲に広視野低解像度映像を提示する方法で視線追従型映像提示方式と呼ばれる。以下にその概要を述べる。

#### 1.3.1 視線追従型映像提示の概念

人の視覚は、注視する一定領域でのみ高解像度の映像を受容する能力を持つ[29-35]。そこで Fig.1.4 の概念図に示すように、注視している部位の映像

のみ高解像度提示し、周辺の映像を低解像度であるが広視野に提示する。いま Fig.1.5 のような映像が提示されていて、A 点を注視しているとすれば、このとき、その周囲の小領域が高解像度で提示されている。次に B 点に視線を移したとすると、視線検出が行われて、B 点の周囲が高解像度で提示されるようになる。このような制御を繰り返すことで、スクリーン上に映し出される映像を、等価的に広視野高解像度の映像として観測させることができる。これにより従来のディスプレイデバイスを用いながらも広視野高解像度映像を提示でき

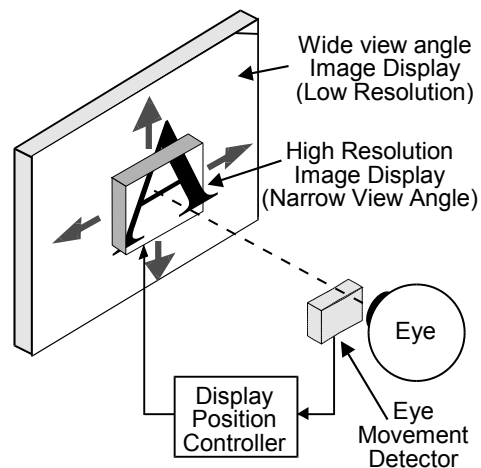


Fig.1.4 Concept of an eye movement tracking type image display system

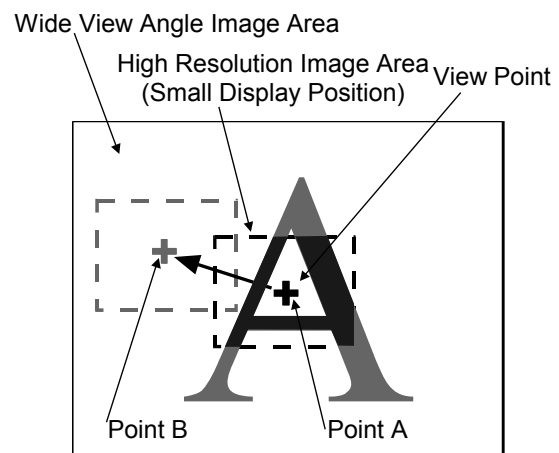


Fig. 1.5 A sample of presented image



る。この方法は広視野、高解像度映像提示の課題をいわばオプトメカトロニクス的方法で解決しようとするもので、既存のデバイスを用いて実用的なシステムを実現するための有力な方法と考えられる。この方法は、提示映像のすべてが高解像度のディスプレイと比較して、提示のために伝送される映像データ量が少なくできる。さらにこのシステムでは高解像度映像の中心と注視点が一致しているため、実環境での映像取得・提示の際、カメラのオートフォーカス機能によって、常にオペレータの注視点にピントの合った画像を提示できるなどの利点があるため、ロボットの遠隔操作などのように遠隔地の実環境映像を提示する用途、遠隔視覚検査や遠隔手術に向いていると考えられる。さらにこの方式によれば、現在世界で普及している NTSC 方式や PAL 方式で映像提示を行っても臨場感の高い映像提示を行うことができる。このことはシステムの設計時に多くの機器の中からデバイスの選択ができ、さらに現存するインフラを利用可能であることを示しており、災害復旧など信頼性、緊急性を要求される用途でも有効と思われる。またこの考え方は、ディスプレイ、カメラとも十分な解像度のデバイスが開発された場合においても、広視野高解像度映像提示の際に、膨大になる伝送容量を減らす目的で、周辺部の映像を低解像度にしたたり画像の圧縮率を上げるという適用方法も考えられる。

### 1.3.2 類似の研究の概要と課題

このような、広視野低解像度映像上の注視点周りの小領域に高解像度映像を提示する手法について、多くの研究が行われている。

山口らは、広視野低解像度の画像に小領域で高解像度の画像を重ね合わせた静止画像をスクリーンに前方から投影するシステムを実現している[36]。さらにそのシステムを用いて注視点付近の解像度が、12.8cpd または 6.6cpd のとき、注視点から±10度以上の領域の空間周波数が 3cpd 程度よりも高くなるようにローパス処理すると、画面全体が高解像度のものと同程度に知覚されることを明らかにした。また注視点から±10度以上の周辺領域の解像度を 3cpd にした場合、視線移動終了から 300ms 以内に高解像度画像が提示されるとすべてが高解像度の画像との違いを知覚できないことを明らかにした。そして注視している高解像度画像と広視

野画像との境界での画像のぼかし処理についての評価を行い、注視点の中心から、半径 6 度までの円形領域の最高空間周波数を 14cpd、半径 6 度から 8 度までの領域を 7cpd、その外側の半径 10 度までの領域を 5cpd、その外側は 3cpd とした場合、各領域の境界が知覚できないことを明らかにした。この研究では HMD などに搭載するための小型化についての簡単な考察を加えているものの、それ以上の検討は行われていない。また限定された条件下での、高解像度映像の大きさや、視線追従に対する許容遅延時間は検討されているが、その他の条件下での検討は行われていない。

N. M. Dalton らはヘルメットにプロジェクターを配置し、そこから広視野と高解像度の合成映像がスクリーンに提示されるシステムを構築した[37,38]。広視野映像の大きさは対角 144 度、高解像度は対角 36 度である。高解像度の解像度は 1 画素あたりの視野角にして 2 分、広視野映像は 8 分である。航空機のシミュレータ用に開発されたもので、あらかじめ画像がコンピュータに取り込まれており、頭部の向きや視線方向の変化などに合わせて、それらの画像を提示できる。しかしこの研究では構造から考慮しても小型化のためには何らかの検討が必要になるとと思われる。

E. B. Lewis らは、ヘッドマウントディスプレイタイプで、広視野と高解像度の 2 つの画像を提示する方法を考案している[39]。広視野と高解像度の相対位置は変わらず、両映像が視線追従して提示される。提示映像位置は、眼前のミラーの位置や角度を制御することによって変更できる。しかしこの方法では、ミラーが目の前に配置され、そのミラー位置と角度を制御することにより、視線追従と映像提示位置制御を行っている。その構造上、眼前のミラーの大きさには制限があり、そのために提示映像の視野角があまり大きくできず、また視線追従できる範囲も広くできない。またミラー自体の制御方法にも課題が残る。提示される広視野映像の画角は 25 度、高解像度映像の画角は 5 度である。撮像側システムについては、検討はあまり行われていない。このシステムは、航空機のパイロット用に考案されているもので、視覚検査などを遠隔操作で行う用途に用いるためには、映像の画角や視線追従範囲について、より検討を行う必要がある。

A. Yoshida らは、同じく広視野と高解像度の映像

をスーパーインポーズして提示できる光学系を設計している[40]。この光学系では高解像度映像の提示のための設計に特徴がある。小さな光学レンズを16個配置することにより、ひとつの高解像度映像用ディスプレイから提示される映像が16画面分並べて提示されるように構成されている。その16画面分の提示映像領域と広視野映像の提示領域はハーフミラーによって重なるように配置されている。それらの高解像度映像のうち任意の一画面分の領域だけ透過され、他の領域は遮断されるように液晶シャッターが配置されている。この光学系では、高解像度映像が小さなレンズを並べることにより生成されているため、各高解像度映像の周辺部での映像歪や、解像度の低下をいかに防ぐかが課題となる。注視点によっては映像歪や解像度の低下が出る可能性があるなど、課題もあるが、興味深い光学系である。

以上述べてきたように、様々な視線追従型の映像提示システムの研究が行われているが、これらはみなシステムサイズが大きく、現場近くに持ち運んで操作する遠隔用視覚検査などに用いるための小型化の検討などはほとんど行われていない。

### 1.3.3 その他の関連する研究について

また、従来の映像提示装置に視線検出機能を付加したものも研究されている。それらは目的や適用されるアプリケーションは異なるものの、視線検出機能や、映像提示の仕組みには一部共通したところがある。山崎らは、見たところにピントを合わせられる視線入力を搭載したHMDを開発した[41][42]。福島らは、HMDを使用する際の体調チェックや、提示映像の適否の判断のため、瞳孔径や瞬目を検出できるHMDを試作した[43][44][45]。鈴木らは、見たところにピントが合うAFカメラを目的に一眼レフAFカメラに視線検出機能を付加したものを開発している[46][47]。また周辺が低解像度、一部が高解像度という考え方という点では、合志らは周辺の解像度を落とし、一部領域の解像度を落とさないで提示する方法を検討している[48]。そのようなシステムでは、遠隔操作の際の映像伝送量を減らしつつ、高い作業効率を維持できることが明らかになっている。例えばこの方式をロボットの遠隔操作に用いると、均一な解像度の映像提示と比較して伝送データが同じ場合には作業効率が向上するという報告も行われている。

## 1.4 本研究のアプローチおよび課題

前節での広視野で高解像度の映像提示に関する議論を踏まえて、本研究では遠隔操作による映像提示の中でも、映像の品質がより広視野で高解像度のものが要求される視覚検査作業への適用を目指し、NTSC方式のディスプレイデバイスを用いて、小型の広視野高解像度映像提示システムを開発することを目的として、これらのシステムを実現するために必要な人間の視覚特性の評価とシステムの構成方法について検討し、その結果をもとにシステムの設計、試作を行い、評価実験によって提案する手法とシステムの有効性を確認することを研究目的とする。

このようなシステムを設計開発するためには、高解像度映像の大きさや、視線追従制御の方法など人間の視覚特性に関わる問題について評価を行う必要がある。また、十分な広視野高解像度の映像提示性能を維持しつつ、持ち運べるようなサイズに小型化するためのシステム構成の方法について検討・設計し、システムを試作してその有効性を確認する必要がある。

具体的には検討すべき主な課題として、以下のような項目が挙げられる。

- ①高解像度映像の大きさが適切であること。
- ②高解像度映像がオペレータの視線移動に対して高速に追従すること。
- ③広視野映像上のオペレータの注視点と、高解像度映像の提示位置が一致していること。
- ④高解像度映像の内容が実環境における視線方向のものと一致していること。
- ⑤広視野映像と高解像度映像がスムーズに接続されていること。
- ⑥高解像度映像と広視野映像の色、明るさなどが一致していること。

これらの条件の中で、条件⑤については、光学システムの設計・調整によって解決できると考えている。なおこの条件⑤に関して高解像度映像と広視野映像との境界領域のぼかし処理とその幅について評価した例[36]はあるが、その他の条件についての十分な検討は行われていない。条件⑥につい

では、ディスプレイデバイスなど主にハードウェアの調整によって解決できると考えている。

したがって、本研究では人間の視覚特性を評価し、システムを設計・試作し、その試作したシステムを用いた実環境映像の取得と提示実験によって、上記条件のうち①②③④の条件を提案する手法で満たし得るかを評価することを目的とする。①では被験者を用いた画像提示実験によって適切な高解像度映像の大きさを明らかにする必要がある。また②では、オペレータの視線移動に対して高解像度映像の視線追従の遅れがどの程度まで許容されるのかを被験者を用いて評価する必要がある。そして③④については、システムを試作し、実環境映像の撮像・提示実験によって評価を行う必要がある。なお、ここでは、ロボットの遠隔操作を対象とした検討課題を列挙したが、提案する広視野高解像度の映像提示システムは、提示映像として実環境映像の代わりに計算機で生成したCG映像に変えることによって臨場感の高い映像提示も可能であると考えられる

## 1.5 論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

**第1章「緒論」**では、本研究の背景と課題、従来研究の現状や問題点について論じ、様々な映像提示方法の中で、研究対象として視線追従型撮像・提示システムを取り上げ、本研究の目的、研究課題を明らかにした。

**第2章「注視点近傍における静的視覚特性の検討」**では、人間の視覚特性と映像の認識について論じ、静的な縦縞画像を用いた高解像度映像の大きさに関する評価実験を行い、視線追従型映像提示システムにおける、解像度をパラメータとした際の高解像度と広視野映像の境界が認識できなくなる高解像度映像の大きさについて明らかにする。

**第3章「注視点近傍における動的視覚特性の検討」**では、眼球運動の種類と特性について論じ、

その知見をもとに高解像度映像の視線追従時間遅れに関する評価実験を行った結果と、高解像度映像の視線追従の方法について議論する。

**第4章「映像提示システムの開発」**では、システム具体化のため、プリズム方式、楕円鏡方式、前方投射方式の3方式を考案し、それらの方式の検討を行う。その結果、試作した映像提示システムの構成について、映像の投影方法、高解像度映像の視線追従の方法、視線検出手法について論じる。試作システムを用いて、評価実験を行い、考案した方式の有効性について議論する。

**第5章「映像撮像・提示システムの統合」**では、4章で試作した提示システムに加えて高解像度映像を水平方向だけでなく垂直方向にも視線追従できる機構について検討・試作を行う。さらにその提示システムに対応した撮像システムを構成する。これら両システムを、統合し、被験者を用いた評価実験を行い、直接視および、NTSCによる従来の遠隔操作との作業効率を比較する。

**第6章「視線追従型映像提示システムの設計指針」**では、2章から5章で行われた実験結果をもとに、NTSCディスプレイやHDTVのデバイスの使用を想定した視線追従型映像提示システムの設計指針について述べる。また、周辺視の変化知覚についての考察結果から注視時あるいはサッカードや滑動性眼球運動（スムーズパースト）などの眼球運動に対する制御方法について検討する。また、視線追従型映像提示システムを制御する際の視線検出のタイミング、高解像度映像の移動と提示方法についての考察する。

そして最後に**第7章「結論」**では、本研究を総括するとともに、今後の課題や将来の展望について述べる

## 第2章 注視点近傍における静的視覚特性の検討

### 2.1 緒言

本章では、視線追従型映像撮像・提示システム設計の基礎データを得ることを目的として、広視野映像上の小領域に高解像度映像がスーパーインポーズして提示される時、その境界を認識させない高解像度映像の大きさについて評価した結果を述べる。

提案する視線追従型映像提示システムでは、視線に追従させて提示する高解像度ディスプレイの大きさを、その映像を背景の広視野ディスプレイ画像に重ね合わせていることを意識させないように定めることが重要である。映像提示システム設計に有用と思われる視覚特性としては、人の視覚系の基礎研究分野において、網膜の中心周囲および周辺視の視力特性が定量的に調べられている。また眼球の運動特性についても多くの研究成果があり、滑動性眼球運動と断続性眼球運動の2種の眼球運動形態の存在や、特に後者では視力が低下するなど運動中の視力特性も一部明らかにされている。また映像提示システムへの応用を意識した研究としては、山口らが、SMPTE 標準画像を用いた心理物理実験により、視線中央の視野角 20 度より外側の領域では空間周波数 3cpd(cycle per degree)以下の分解能の映像の差は知覚できないことを明らかにしている[36]。また V.Virsu らは白黒格子模様を用いて、視野角と識別できる空間周波数の関係を調べている[34]。これら過去の研究のデータは高解像度ディスプレイの視野角決定に一部手がかりを与えるものといえる。しかし、システムの最適設計を目指す上では十分とはいえない。分解能の異なる重畳された2つの映像の境界の識別のしやすさは、高解像度映像の大きさに依存することはもちろんであるが、それだけでなく背景となる広画面低解像度の映像との分解能の差にも依存する。すなわち上記のディスプレイ設計の基礎データとしては、背景画像の分解能をパラメータとした高解像ディスプレイ視野角の検討が不可欠である。

本章では視線追従型映像提示システム設計の基礎データを得ることを目的として、人の中心視野および周辺視野の視力特性を心理物理的手法によ

り検討した結果とそれに基づき NTSC ディスプレイで視線追従型映像提示システムを構成した場合の高解像度視野角の大きさについて考察した結果について述べる。

### 2.2 実験装置

実験装置は Fig. 2.1 に示すように映像提示装置と視線検出装置およびあご台から構成される。映像提示装置としてはシリコングラフィックス社製の IRIS120GTX を使用した。そのディスプレイの大きさは 19 インチで横 1280 ドット縦 1024 ドットの分解能のコンピュータで生成された映像表示が可能である。これにより、画面より 20cm 離れた位置から提示映像を観測するとすれば、像の空間周波数は最大 6.5cpd で、水平方向約 88 度、垂直方向約 71 度の視野角を確保できる。ディスプレイはカラー表示が可能であるが、実験では白黒映像を用いた。その輝度は白から黒まで 256 段階の変化が可能である。

視線検出装置には赤外 LED と 4 つのフォトダイ

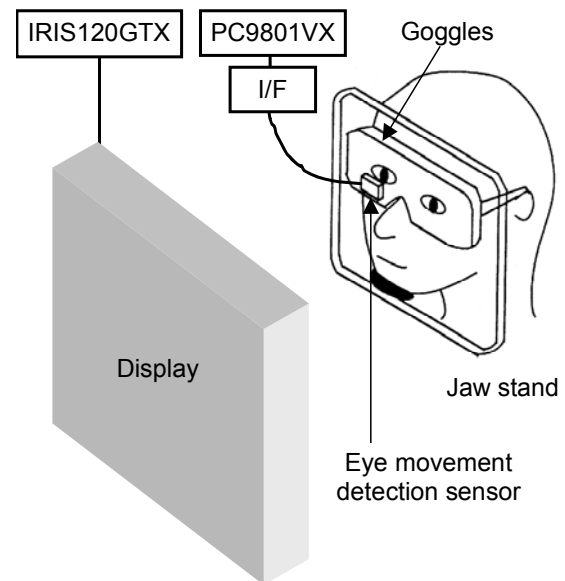


Fig. 2.1 Experimental setup

オードから構成される，市販の眼球検出センサ（T.K.K.2930h 竹井機器社製）を用いた．それは，Fig. 2.2 に示すように眼球に赤外光を照射し，その反射光をフォトダイオードで受光するもので，白眼と黒眼の反射率の違いにより黒眼が動くときフォトダイオードの出力が変化することを利用した強膜反射法を用いたものである[29][30]．実際の視線検出センサの形状は，Fig. 2.3 に示すように2つの赤外光 LED と4つのフォトダイオードから構成されている．中央に配置された2つの赤外光 LED によって眼球に赤外光を照射し，その反射光をフォトダイオードで検出する．上の2つのフォトダイオード出力の差を視線検出水平方向，下2つのフォトダイオード出力の和を垂直方向として検出できる．各ダイオードの出力は約 60mS のサンプリングレートで AD 変換器を介してコンピュータ(PC98VX 日本電気社製)に読み込み，視線検出処理を行うとともにその動きをメモリに記録した．この視線検出装置は眼鏡の右目フレームに取り付

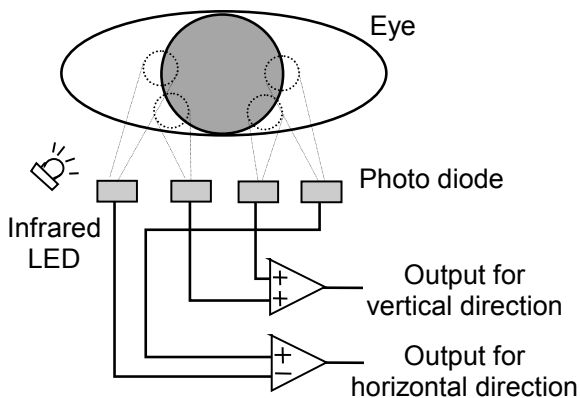


Fig. 2.2 Limbus tracking method

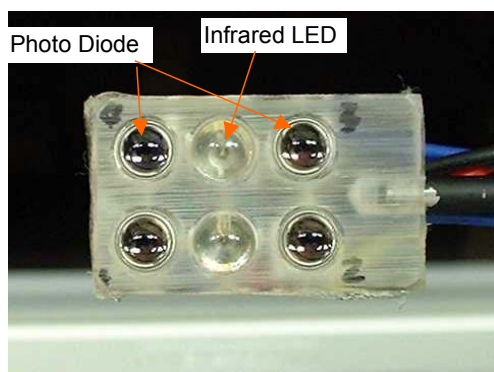


Fig. 2.3 Eye movement detector

けられている．視線検出装置は実験中の視線位置をモニタするために用いられた．

実験に際しては，あご台を使用した．被験者がその上にあごをのせたときに眼球位置がほぼディスプレイ前方 20cm または 60cm に来るようにそれを設置した．被験者は眼鏡をかけてあごを固定し，グラフィックス上に表示される各種画像の識別実験を行った．

### 2.3 実験方法

1 章で提案した映像提示システムにおいて，高解像度映像提示領域の大きさを決定する基礎データを得るために，ある映像を視線周囲領域において高解像，その周辺領域で低解像で提示するとき，高解像の提示領域をどの程度にすればその境界の存在が検知できなくなるかを評価する実験を行う．最適な高解像度の提示領域は個人差があると予測されるが，本実験では個人差の分布を詳細に調べるのではなく，ここではシステムの設計指針を得るために，多くの人が境界の存在が検知できない大きさを評価することを目的とする．人がカバーする視野は 2 次元的広がりを持つ．従って人の視覚特性を考える場合，水平，垂直両方向の特性を考慮すべきであるが，垂直方向の眼球の運動領域

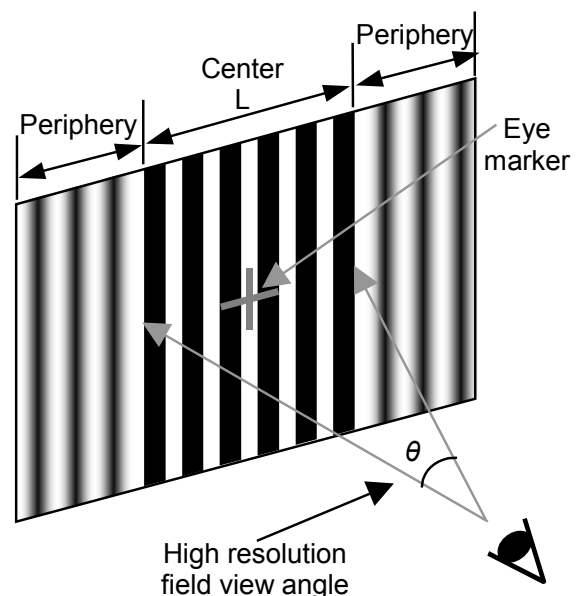


Fig. 2.4 The structure of variable stimulus

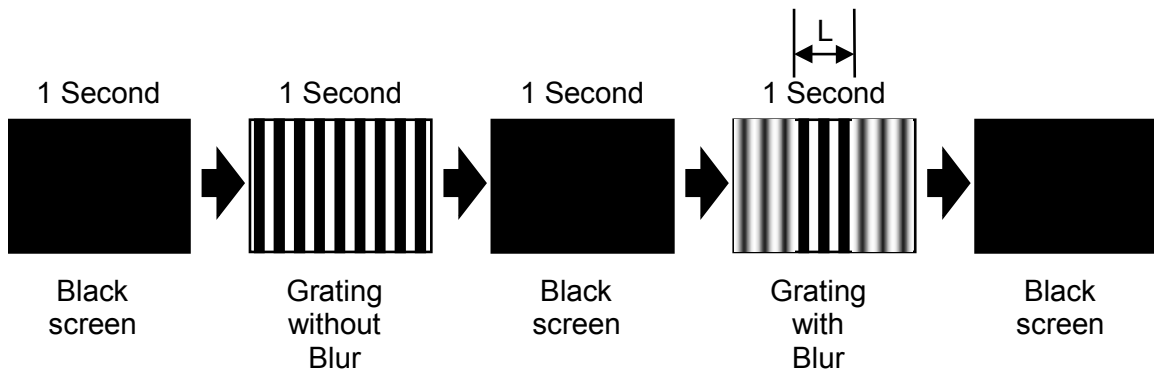


Fig. 2.5 The procedure of presenting stimuli

は、水平方向のそれに比べて狭いことから、本研究では、特に水平方向の特性に注目し、検討する。実験では白黒の縦縞パターンを標準パターンに採用し、極限法[53]を用いて以下の手順で行った。まず基準刺激として全面同じ空間周波数の縦縞模様、変化刺激として周辺が低解像度で、中心部が基準刺激と同じ空間周波数の縦縞模様を用い、基準刺激と変化刺激との対を提示して両者の差を識別させた。Fig. 2.4 に変化刺激の構造を示す。ここで、中心部の高解像度の縦縞模様の幅を  $L$ 、それをカバーする視野角を高解像度視野角と定義し  $\theta$  で表す。実験は、上昇系列、下降系列の 2 種の実験から構成される。上昇系列実験では、確実に基準刺激との差が識別できるある変化刺激がもつ中心部高解像領域の幅を  $L_1$  とするとき、 $L_1 < L_2 < L_3 \dots$  なる刺激を用意し、この順にそれぞれ基準刺激との比較を行わせた。また下降系列実験では、まず基準刺激と識別できない中心部の幅  $L_n$  をもつある変化刺激を選び、これに対しさらに  $L_n > L_{n-1} > L_{n-2} \dots$  なる刺激を選び、この順に基準刺激との識別を行わせた。回答は次の 3 種を選択させた。(1) 中心部高解像領域と周辺部低解像領域の境界が明瞭に識別できる、(2) 基準刺激と変化刺激の差は分かるが高解像領域と低解像領域の境界は知覚できない、(3) 基準刺激と変化刺激の差が分からない。各基準刺激・変化刺激対の識別では、Fig. 2.5 に示すように全画面黒、基準刺激、全画面黒、変化刺激の順に各 1 秒ずつ提示し、また被験者に高解像領域の中央を注視させるために、これら 4 種の画像にはあわせて中央に Eye-Marker (Fig. 2.4 参照) を表示し、被験者にはそれを注視しつつ識別を行

うことを要求した。Eye-Marker を注視しているか否かは、実験中被験者に装着させた眼鏡に取り付けられている視線検出装置で確認した。識別中視線が Eye-Marker からずれたことが確認された場合は、そのデータは結果から削除した。

さて、上記実験において中央部高解像領域と周辺部低解像領域の境界の識別のしやすさは、緒言にも述べたように高解像度領域の大きさだけでなく、両領域の解像度の差にも依存する。そこで上記実験は解像度をパラメータとして行った。各種解像度の縦縞模様は Fig.2.6 に示すように、画面上の各ドットの輝度を空間平均処理して作製した。本実験では前節で述べたように、眼球ディスプレイ

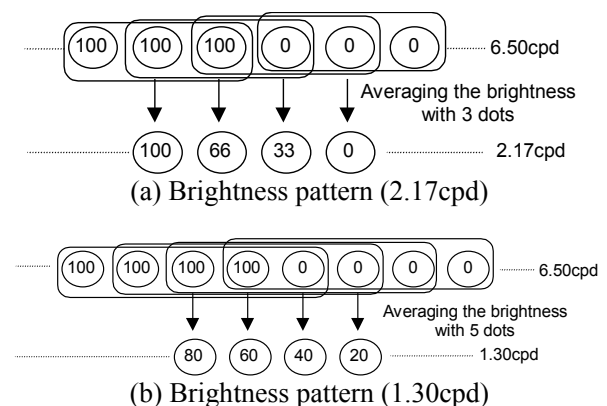


Fig. 2.6 Method of generating patterns with different resolution

間距離を 20cm または 60cm としているが距離 20cm の場合には、視野角 1 度に対応するディスプレイ上の幅は約 3.5mm である。この幅は使用したディスプレイの水平方向分解能から換算すると 13 ドットを含む。平均処理を加えない状態では 1 画素ごとに白と黒を表示できるので、この時の白と黒のサイクルは 6.5 回/度となり、空間周波数 6.5cpd の縦縞が得られる。これを使用した実験システムで発生できる最高分解能縦縞模様とした。一方、隣接する両ドットを含む 3 つのドットの輝度を平均化し、それを中央のドットの位置の輝度とすれば白と黒のサイクルは 2.17 回/度となるので、空間周波数 2.17cpd の縦縞が得られる。これを 2 番目に分解能の高い縦縞模様とした。以下同様にして隣接する両側の 2 ドット、3 ドット、4 ドット、5 ドットの輝度を平均化して、それぞれ空間周波数 1.30cpd, 0.94cpd, 0.73cpd, 0.59cpd の縦縞模様を作製した。さらにより高い空間周波数の縦縞を得るため、眼球-ディスプレイ間距離を 60cm に離して同様の処理を行った。すなわちこの時の視野角 1 度に対応するディスプレイでの幅は約 10.5mm となる。従ってディスプレイの水平方向分解能から 40 ドットを含む。よって最高の空間周波数として 19.84cpd を得る。一方、隣接する両ドット、4 ドット、7 ドットの輝度を平均化してそれぞれ 6.61cpd, 2.20cpd, 1.32cpd の縞模様を得た。こうして作製したそれぞれの空間周波数の縦縞を中心部高解像度領域、周辺部低解像度領域に Table 2.1 のように組

み合わせて、変化刺激を作製、それぞれについて上述の比較実験を行った。

ここで Table 2.1 の条件 No.1~9 は、眼球-ディスプレイ間距離 20cm、条件 No.10,11 は距離 60cm である。条件 No.4 と条件 No.11 では空間周波数条件をほぼ等しいものを用いている。これは眼球-ディスプレイ間距離 20cm と 60cm の条件の違いによる差が判定結果に及ぼす影響を考察するためのものである。

一方、提示する縦縞模様は、ドット単位で白黒を反転して表示するのが最も濃淡の細かいパターンとなるが、この場合、平均処理により濃淡がすぐに均一化し、上述した処理による空間周波数の低いパターンの表示が困難になるため、視野角 1 度を 1 単位として白黒を反転させる縦縞模様を用いた。また表示パターンの輝度は被験者が不快感を持たない範囲の最大値を試行錯誤的に設定した。

実験を行うにあたっては、まず被験者に眼球運動検出装置を取り付けた眼鏡を掛けさせた後、ディスプレイの前に置かれたあご台にあごを固定して座らせ、片方の目(右目)で Fig. 2.5 の一組のパターンが提示されている間(4 秒)は瞬きをせずディスプレイを直視するよう要求した。このとき反対側の目(左目)は、眼帯で遮へいた。実験プロセスはすべてコンピュータのソフトで管理されている。すなわち実験開始の合図と共に、コンピュータはディスプレイ上に Fig. 2.5 の手順でパターンを発生し、被験者の回答を待つ。被験者が 3 種の回答の何れかをキーボードに入力すると、次のパターンが提示される。上昇、下降系列実験のいずれにおいても、各試行における最初の変化刺激は条件を満たすものの中からランダムに選択し、以下中心部高解像領域の幅を高解像度視野角換算で眼球-ディスプレイ間距離 20cm の時 5 度づつ、距離 60cm の時 2.5 度づつ変化させた。各系列の実験はそれぞれ 3 回行いそれらの平均値を最終データとした。1 系列の実験に要する時間は約 5 分である。1 系列の実験 3 回はすべて連続して行ったが、次の系列の実験に移る場合はその間に十分な休憩時間をおいた。被験者は本実験の意味を周知している健常男性 3 名(ランドルト視力, 0.3, 1.2, 0.8, 女性 1 名(同視力, 1.0) である。ただし、女性被験者のみコンタクト装着時の視力である。実験はすべて暗室で行われた。以上の実験手順の概要を Fig. 2.7 に示す

**Table 2.1** The resolution conditions in central area and periphery area

Condition No.	Central resolution $f_c$ (cpd)	Peripheral resolution $f_p$ (cpd)
1	6.50	0.59
2	6.50	0.73
3	6.50	0.93
4	6.50	1.30
5	2.17	0.59
6	2.17	0.73
7	2.17	0.93
8	1.30	0.59
9	1.30	0.73
10	19.84	2.20
11	6.61	1.32

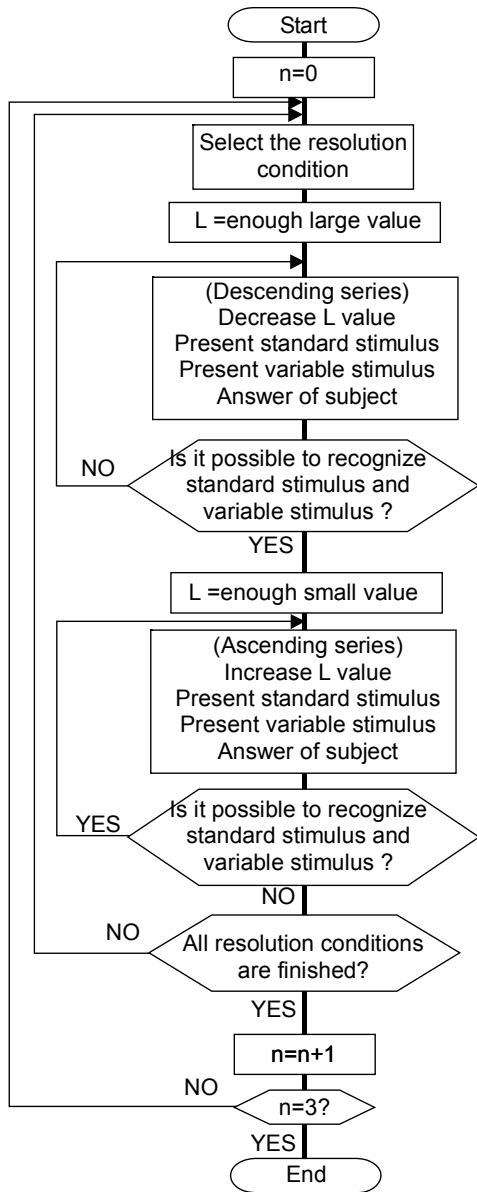
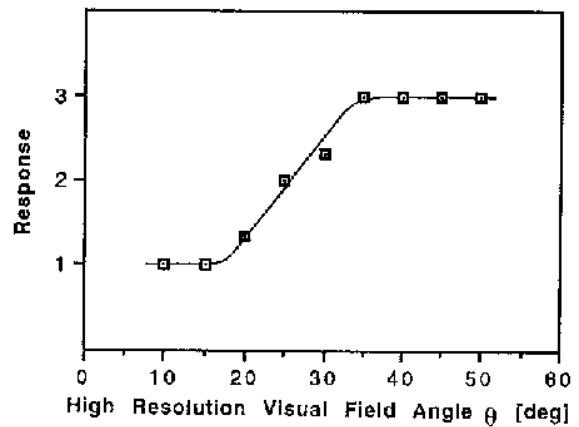


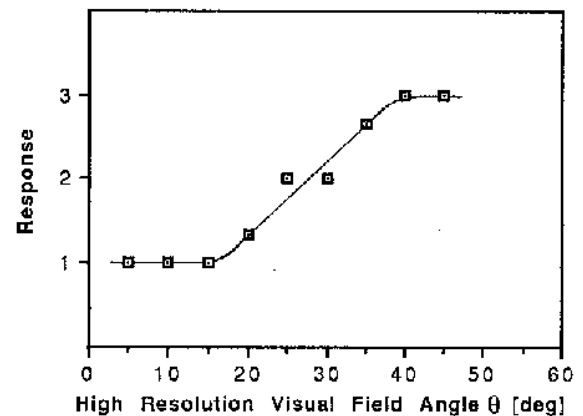
Fig. 2.7 The flow chart of experimental procedure

## 2.4 実験結果と考察

Fig. 2.8 (a),(b)に下降系列及び上昇系列の実験結果の一例（中心空間周波数 6.50cpd, 周辺空間周波数 0.59cpd）を示す. 高解像度視野角  $\theta$  を横軸, 3回の試行で得たそれに対応する回答から算出した値を縦軸に表示した. この実験のように, 大, 小



(a) descending series



(b) ascending series

Fig. 2.8 An example of experimental results

反応に加えて等疑反応を許す場合には, 1つの等疑反応は, 0.5の大反応と0.5の小反応からなるとみなし[53], この縦軸の値は, 1つの回答(2)は, 0.5の回答(1)と0.5の回答(3)からなると考えて, 回答(1),(3)にそれぞれ得点1, 3を与えて計算した. この図より, 上昇系列, 下降系列とも境界を明瞭に識別できる場合(1), あるいはできない場合(3)から曖昧な状態(2)を経て, 他の識別状態へ移行していく傾向が認められる. 他の条件下での実験についても同様の傾向を示す結果が得られた. 一方, Fig. 2.8のデータを得た3回の実験の内の一つで測定された眼球運動検出装置の出力の時間経過を Fig. 2.9に示す. それぞれのプロットは検出装置中の4つの



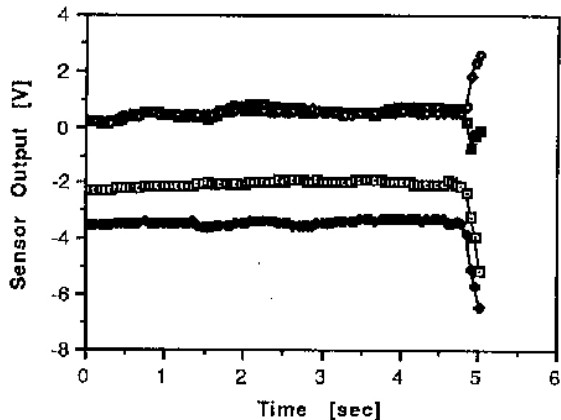


Fig. 2.9 An example of eye movement detected by sensor (Subject T.M)

フォトダイオードの出力を示している。この結果から実験中眼球位置はほぼ一定位置にあり変動しないことがわかる。このフォトダイオードの出力は、ほぼ提示画面上に与えた Eye-Marker 位置を眼球が注視しているときのそれに等しいことを、予備実験として行った眼球運動検出装置のキャリブレーションより、確認している。また他の実験においても、眼球が安定に Eye-Marker を注視しつつ行われていることはフォトダイオード出力より同様に確認できた。

Table 2.1 に示した 11 種の中心部空間周波数、周辺部空間周波数の組それぞれに対して得た、3 回平均の上昇系列、下降系列実験データから分解能が異なる領域の境界が識別できなくなる時の高解像度視野角  $\theta_m$  は以下によって算出した。まず Fig. 2.8 のような傾向をもつデータを 3 本の直線、すなわち回答が 1 から 3 あるいは 3 から 1 に移る傾斜部分を近似する直線および、回答 1, 3 をそれぞれ通り横軸に平行な直線で近似する。次に、上昇系列結果においては回答 1 を通る横軸に平行な直線と傾斜部分の直線との交点に対応する高解像度視野角  $\theta_u$ 、下降系列では回答 3 を通る横軸に平行な直線と傾斜部分の直線との交点に対応する高解像度視野角  $\theta_u$  を求め、これらの中間値を  $\theta_m$  とする。すなわち、

$$\theta_m = (\theta_u + \theta_u) / 2 \quad (2.1)$$

により  $\theta_m$  を算出する。

こうして計算される高解像度視野角  $\theta_m$  を Table 2.1 の各組に対してそれぞれ求めた。ここで条件 No.10,11 においては被験者 K.I は視力不足のため眼鏡をかけ矯正視力 1.0 で行い、被験者 T.M はこの条件の実験を行っていない。Table 2.2 は条件 No.4 及び No.11 における実験結果である。前述のように両条件は空間周波数条件はほぼ等しいが、眼球-ディスプレイ間距離はそれぞれ 20cm(No.4), 60cm (No.11)と異なる。Table 2.2 は異なる観測距離を持つ等しい周波数条件下の実験がほぼ同一の結果を与えることを示している。この結果から眼球-ディスプレイ間距離を 60cm, 20cm というように変化しても実験によって求められる、高解像度視野角  $\theta_m$  データはほぼ等しく、空間周波数条件の一致する実験結果はほぼ同等に取り扱えることが判明する。さて次に Table 2.1 の条件 No.1-10 について、中心部の空間周波数を  $f_c$ 、周辺部のそれを  $f_p$  として  $f_c$  をパラメータに、 $f_c/f_p$  に対する高解像度視野角  $\theta_m$  の変化をプロットすると Fig. 2.10 の様になる。この図から中心部の空間周波数  $f_c$  を一定とすると横軸  $f_c/f_p$  の増加に伴い高解像度視野角  $\theta_m$

Table 2.2 Experimental results (The resolution conditions No.4 and No.11)

Condition No.	High resolution field view angle $\theta_m$		
	Subject Y.N	Subject E.M	Subject K.I
4	15.0	11.5	13.3
11	16.5	16.0	14.1

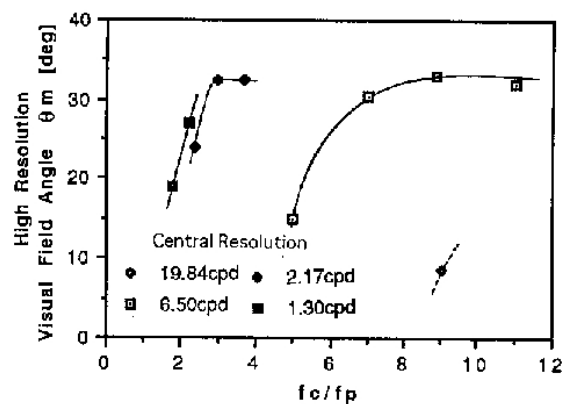


Fig. 2.10 The relation between  $f_c/f_p$  and high resolution visual field angle  $\theta_m$  (Subject Y.N, eyesight 1.2)

は増加し、約 33 度で飽和することがわかる。すなわちこの結果から高解像度視野角  $\theta_m$  は  $fc/fp$  の比に依存して決まることがわかる。

Fig. 2.10 は、実験で調整したパラメータ範囲内の結果を示しているがより広い範囲で変化する  $fc, fp$  に対する高解像度視野角  $\theta_m$  の変動傾向を予想するために空間周波数に変数変換処理を行うことを考える。一般に我々はある空間周波数の模様を見たとき、ある生理的・心理的過程を経て、模様がはっきりしているとか、ぼやけているといった認識を持つと考えられる。この認識は例えばある模様が持つ解像度に応じて人が持つ感覚量  $S$  によってなされると仮定する。こうした感覚量  $S$  は当然、模様の空間周波数  $f$  の関数になるが、また人はぼけや明瞭さがある程度以上になるとその差を認識できなくなるから、 $S$  は  $f$  の両極限  $0, \infty$  において飽和する傾向を示す  $f$  の関数になると考えられる。そこで空間周波数  $f$  の  $0 \sim \infty$  の変化に対応して感覚量  $S$  がそれぞれ  $0$  あるいは  $1$  で飽和する変換式に注目する。すなわち完全にぼけのない模様に対して  $S = 1$ 、逆に  $f$  が小さくその模様が知覚できなくなったときにも  $S = 0$  とし、空間周波数  $f$  が  $0$  の時  $S = 0$ 、 $f$  が増加するにしたがい  $S = 1$  に飽和する特性を持つ  $f$  の関数  $S = S(f)$  を考える。このような関数はいろいろ考えられるがここでは

$$S = 1 - \exp(-\alpha \times f) \quad (2.2)$$

(ただし  $\alpha$  : 定数)

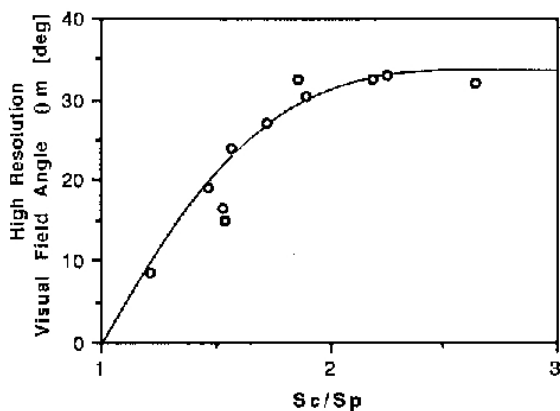


Fig. 2.11 The relation between  $Sc/Sp$  and high resolution visual field angle  $\theta_m$  (Subject Y.N, eyesight 1.2)

と仮定する。Table 2.1 の各組の条件に対する実験結果について仮に  $\alpha = 0.8$  として中心部の空間周波数  $f = fc$  に対応する感覚量を  $Sc$ 、周辺部  $f = fp$  に対応するそれを  $Sp$  とし、その比  $Sc/Sp$  を横軸、高解像度視野角  $\theta_m$  を縦軸に結果を整理すると、Fig. 2.11~2.14 のようになる。ここで、各グラフはそれぞれ各被験者の結果に対応している。いずれの被験者の結果もほぼ 1 曲線に沿う傾向を示し、高解像度視野角  $\theta_m$  は  $Sc/Sp$  が 1 に近づくにつれてすなわち中心部の空間周波数に周辺部のそれが近づくにつれて減少する傾向が認められる。また  $\alpha$  の値については本来なら最適値を求めるべきであるが、本実験の目的が高解像度視野角  $\theta_m$  の特性の傾向を知ることであるので、ここでは高解像度視野角  $\theta_m$  の特性を知ることのできる  $\alpha$  の値の範囲から適当に選択するにとどめた。なお実験データのばらつきを調べるため、Fig. 2.14 の被験者について 3 章の実験装置を用いて、中心部 6.86cpd、周辺部 1.37cpd の条件にて、下降・上昇系列 15 往復の実験を行った。この条件は本章の Table 2.1 空間周波数条件の中 No.4 にほぼ等しく、 $Sc/Sp = 1.50$  である。この空間周波数条件はグラフから、 $Sc/Sp$  の変動に対して、高解像度視野角  $\theta_m$  の変化が比較的大きい条件を選んだ。3 章の実験装置で再現でき、かつ最もばらつきが大きいと予想される条件である。また計算には、下降・上昇系列 1 往復ごとに高解像度視野角  $\theta_m$  を算出し、得られた 15 標本から評価した。その結果得られた高解像度視野角の平均

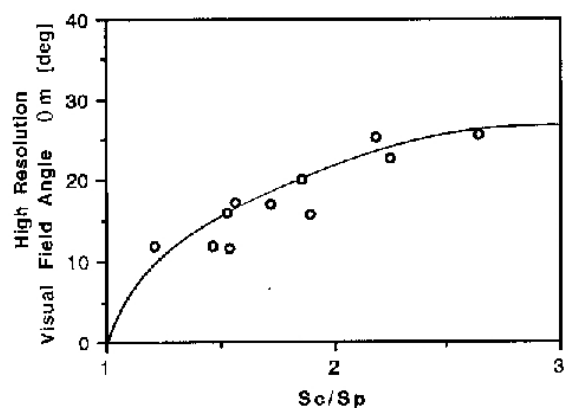


Fig. 2.12 The relation between  $Sc/Sp$  and high resolution visual field angle  $\theta_m$  (Subject E.M, eyesight 1.0)

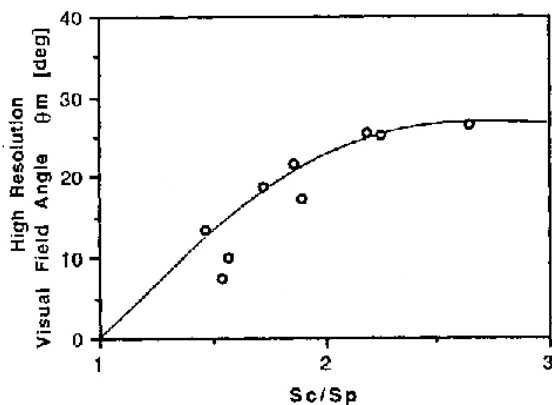


Fig. 2.13 The relation between  $Sc/Sp$  and high resolution visual field angle  $\theta_m$  (Subject T.M, eyesight 0.8)

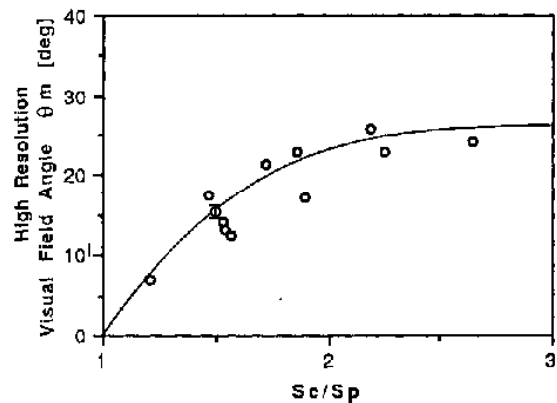


Fig. 2.14 The relation between  $Sc/Sp$  and high resolution visual field angle  $\theta_m$  (Subject K.I, eyesight 0.3)

値は 15.5 度，標準偏差 1.34 であり，Fig.2.14 にその値を示した。

さて，これらの結果からわかることは， $Sc/Sp$  を小さくすれば，すなわち縞模様を中心部と周辺部の空間周波数の差を小さくすれば，高解像度視野角  $\theta_m$  は小さくなり， $Sc/Sp$  を大きくすれば，すなわち空間周波数の差を大きくすれば，高解像度視野角  $\theta_m$  は大きくなるということである。空間周波数の差が 0 の状態では，高解像度視野角  $\theta_m$  は 0 であるから，空間周波数の差を小さくしていくと，高解像度視野角  $\theta_m$  が 0 に近づくことは容易に予想できる。しかし逆に空間周波数の差を大きくしていくと高解像度視野角  $\theta_m$  はいくらでも大きくなるかといえば必ずしもそうではなく，すでに述べたようにある一定値で飽和する傾向が認められる。例えば Fig. 2.11 の被験者ではほぼ 33 度で  $\theta_m$  は飽和する傾向が認められる。また他の被験者についても Fig. 2.12~2.14 から同様の傾向が認められ，飽和する  $\theta_m$  は 3 者とも約 26 度である。この飽和現象は人の網膜の構造からくるものと考えられる。人の網膜の視細胞である錐体の分布密度は視野角に換算して中心窩から  $\pm 15$  度以内で最も高く，その外側では密度が低下し高分解能の像を識別する能力がない。この角度は個人差があるものの，上述の視野角  $\theta_m$  が飽和する時の角度にほぼ一致している。このことは，空間周波数の差にかかわらず

中心窩周辺の視力の高い領域の外側に境界が結像する場合は，その識別が困難になることを示唆しており，この飽和角度が視線追従型提示系の高解像度ディスプレイの大きさの最大値を決定する際の重要なファクタになると考えられる。

## 2.5 結言

本章では，中心部と周辺部で異なる解像度を有する縦縞模様パターンを表示刺激に用いて，解像度の境界を判別させる実験を行い，こうした視線追従型画像提示系を設計する際に必要な，高解像度ディスプレイの大きさを決定する基礎データを明らかにした。結果をまとめると以下ようになる。

- ①中心部と周辺部で解像度の異なる像を提示した場合，解像度の差にかかわらず，中心部高解像度像の幅をある値以上にするとその境界の識別が困難になる。このときの高解像度視野角は，26 度から 33 度である。この特性は人の網膜の生理学的構造に起因すると推定される。
- ②物理量である空間周波数から感覚量への変換操作を導入することにより，より広範囲の空間周波数に対応した高解像度視野角  $\theta_m$  の変動傾向を導いた。

## 第3章 注視点近傍における動的視覚特性の検討

### 3.1 緒言

本章では視線追従型映像撮像・提示システム設計のために必要な、視線追従する高解像度映像提示の許容できる時間遅れについて述べる。1章で提案したような視線追従型映像提示システムでは視線移動に対する高解像度映像の追従は、理想的には時間遅れなく行われるべきである。しかし実際のシステムでは、視線検出時間、高解像度映像の移動時間などが必要となるため、時間遅れ無しで高解像度映像を視線に追従させることはできない。

一方、人間の視覚特性について考慮すると、視線移動に関する眼球運動には、滑動性眼球運動(スームパースト)と断続性眼球運動(サッカード)がある[29-33]。滑動性眼球運動(スームパースト)は、運動物体を視線が追うときのスムーズで低速の眼球運動で、速度限界 30 度/秒程度であり、対象が静止している場合には、意識的にこの運動を行おうとしてもできない。それに対して、断続性眼球運動(サッカード)は、読書時や静止している対象を見ているときの高速の跳躍的運動で、視覚検査や土木作業、遠隔手術などの遠隔操作を想定すると非常に発生頻度の高い視線移動だと考えられる。最高速度は 300 度/秒で発生周期 0.2~0.4 秒の範囲に多く分布する。これは、視線が一点に移ったときに、その点を十分な視力を持って認識するのにある程度の時間を要するためと推定されている。また、このサッカードの直前数十ミリ秒から終了後しばらくの間、視覚の知覚機能が著しく低下するサッカード抑制と呼ばれる現象が起こることが知られており、これは眼球の高速運動に伴って像が流れる不快な現象を避けるためと考えられている。

人間の視覚のもつこのサッカード抑制によれば、視線追従する高解像度映像がある程度の時間遅れをもって提示されても人はそれに気づかないと考えられ、もしこの時間遅れが明らかになれば、今後のシステム設計の重要な指針の一つとなる。これまでサッカード抑制に関して様々な実験が報告されているが、それらの多くは、サッカードの前後で刺激を短時間表示させ、被験者に回答させるもので、例えば光点の検出率、コントラストの感度、色の識別、位置変化の検出、運動方向の分別などを刺激とした評

価実験の結果[49]が報告されている。しかしこの抑制効果は、提示刺激の内容によるばらつきのあることが明らかとなっている。我々の目的とする視線追従型の映像提示システム構築のために必要なサッカード抑制に関わる時間特性、すなわちどこを見ても高解像度であると感じられる高解像度映像の追従時間遅れについては報告されていない。

本章では、高速な視線移動(サッカード)を行った後、ある遅延時間をもって低解像度から高解像度に切り換わるコンピュータグラフィックス画像を提示し、それが常に高解像度であると感じられるための許容できる時間について被験者を用いた評価実験結果を報告する。なおこの時間遅れには個人差があると予測されるが、本実験では個人差の分布を詳細に調べるのではなく、ここではシステムの設計指針を得るために、多くの人が見て常に高解像度映像であると感じられる時間遅れを評価することを主眼とする。

### 3.2 映像提示評価実験システム

#### 3.2.1 システムの構成

実験システムの外観を Fig. 3.1 に、その制御システム構成を Fig. 3.2 に示す。このシステムは、制御用コンピュータ、AD 変換器、20.1 インチの液晶ディスプレイ、視線検出センサ、画像提示タイミング検出センサ、被験者の頭部を固定するためのあご台からなどから構成されている。このシステムでは被験者の左眼前方には遮へい板があり、右眼で提示画像を見て実験を行う。実験のための提示画像はコンピュータによって生成され、ディスプレイに提示される。同時に視線検出センサの出力、画像提示タイミング検出センサの出力が AD 変換器を経由してコンピュータに取り込まれる。液晶ディスプレイは、LL-T2010W (シャープ社製)、コンピュータは PCG-GR5E/BP (ソニー社製)、AD 変換器はカードタイプの AD12-8(PM) (コンテック社製)を使用した。この構成によって被験者に画像を提示すると同時に、視線移動の開始・終了および画像提示時間を計測できる。すなわち視線移動終了から高解像度が提示されるまでの時間(提示時間遅れ)の計測が可能

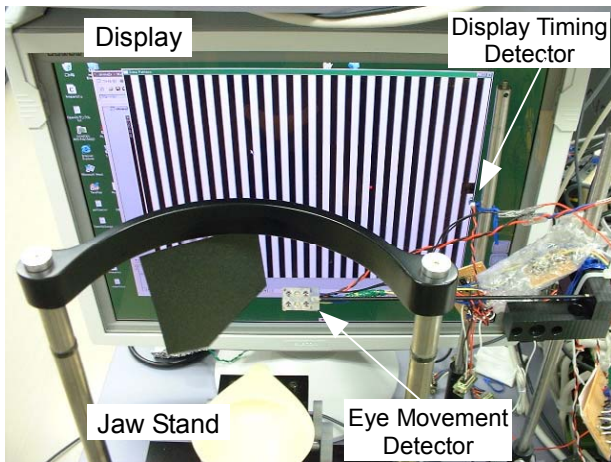


Fig. 3.1 Experimental setup

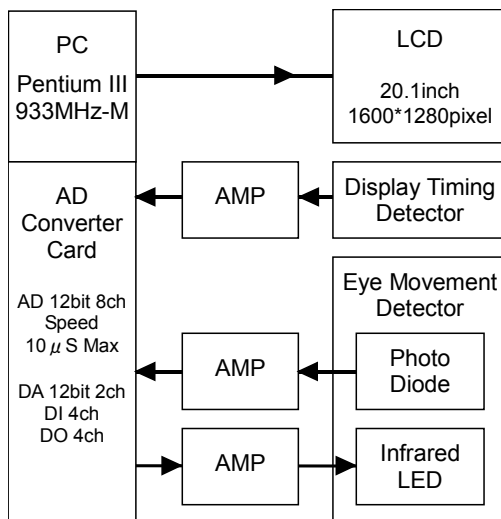


Fig. 3.2 Structure of control system

用いた。センサは前章で用いたのと同形状のものを使用した。センサ回路からの出力の時間遅れは数  $\mu$  S であり、本システムの視線検出のサイクルタイムは、実測で約  $145 \mu$  S である。

### 3.2.3 画像提示タイミング検出センサ

本実験では、ディスプレイに画像が提示される時間を正確に知る必要がある。本実験システムの構成では、PC 内で画像表示命令が出たのち、PC からディスプレイに信号が出力され、またディスプレイでは周波数 60Hz のノンインターレス方式で画像が表示されている。そのため PC が画像の表示命令してから、画像がディスプレイに表示されるまでにはある程度の時間遅れが生じている。そこで Fig. 3.3 に示すようにディスプレイの直前にフォトダイオードを配置し、その正面の領域を黒や白に変化させ、その輝度変化を検出することで、画像が表示されるタイミングを直接検出できるようにした。実際にこのセンサを用いてコンピュータの表示命令からディスプレイに画像が提示されるまでの時間をオシロスコープを用いて測定した結果、約 33-40mS 程度の遅れが発生していることがわかった。

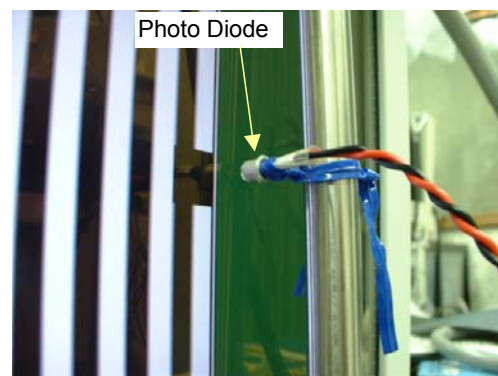


Fig. 3.3 Display timing detector

能となる。

### 3.2.2 視線検出方法とセンサ

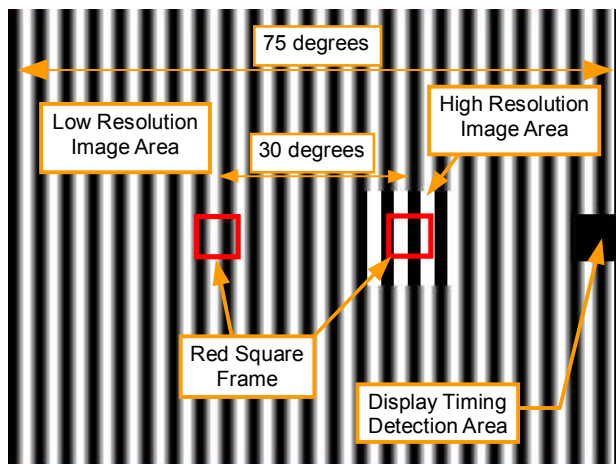
本実験で要求されるセンサ精度は、後述するが水平方向  $\pm 15$  度の位置に並んだ 2 定点間の視線移動を検出する程度だが、サッカーなど高速な視線移動を検出する必要がある。視線検出法には様々なものがあるが、EOG 法、サーチコイル法は被験者への負担が大きく、また画像処理で瞳孔中心を算出する方法や角膜反射法のような、ビデオ信号を用いる方法はその検出サイクルがビデオ信号のフレームレート（通常 NTSC 方式では 30 フレーム/秒）に制限される。そのため、ここでは強膜反射法[29][30]を

## 3.3 実験方法

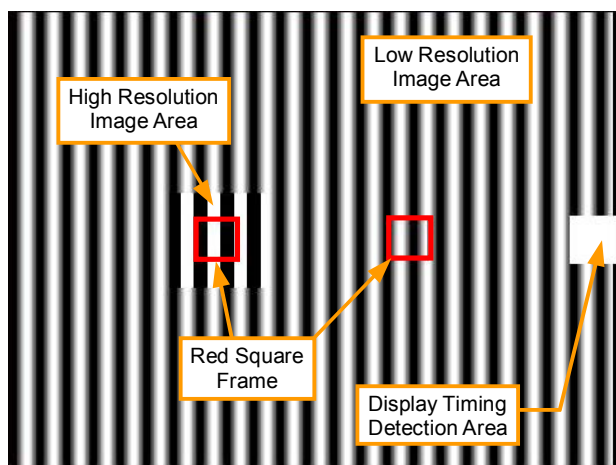
### 3.3.1 実験条件

実験で用いた提示画像を Fig. 3.4 に示す。背景を低解像度の縦縞模様とし、赤線で描かれた四角枠が被験者が注視すべき領域として 2ヶ所示されている。Fig. 3.4(a)では、右側の四角枠の周辺のみ高解像度の縦縞模様で提示され、左側の領域には背景と同じ

く低解像度の縦縞模様が提示されている。一方, Fig. 3.4(b)では左側の四角枠の周辺にのみ高解像度で縦縞模様が提示されている。なお Fig. 3.4 中の文字が書かれている領域は, 本論文での説明のために挿入されているもので, 実際の実験では提示されない。提示されている画像全体の大きさは, 被験者から見た視野角にして水平方向で約 75 度である。四角枠の位置については, 一方の四角枠を注視しているとき, もう一方の四角枠の解像度が判別できない距離を予備実験により確かめ, 水平方向に約±15 度の位置に提示する条件を決定した。また, 赤い四角枠の1辺の長さは被験者からみた視野角にして約3度, 縞模様1サイクルの幅は視野角にして約2度である。この幅は, 低解像度の縞模様を作成しても白と黒の部分が残る, かつ注視している状態では瞬時に高解



(a) First display step



(b) Second display step

Fig. 3.4 Experimental sequence

像度か低解像度か判別できるものを選んだ。Fig. 3.4の提示映像で右端に白や黒が提示されている領域は, 画像提示のタイミングを検出するためのもので, この領域直前に表示タイミング検出用センサが配置され, その出力変化によって, 実際に画像提示された時間を計測できる。このディスプレイタイミング検出用の領域の大きさと垂直位置は, 赤い四角枠と等しくし, 四角枠周辺の画像が描き換わる時間と一致するように設定した。

提示される低解像度の縞模様は, 何も処理を行っていない縞模様に対して, 隣接する水平方向の左右1~3画素までの輝度を平均化することにより, 解像度の異なる縞模様を作成した。本実験では, 眼球-ディスプレイ間距離を 20cm としており, この場合視野角 1 度に対応するディスプレイ上の距離は, 3.49mm である。この幅は, ディスプレイの水平方向解像度から換算すると, 13.71 画素を含む。このとき 1 画素ごとに白と黒を表示できるので, 白と黒

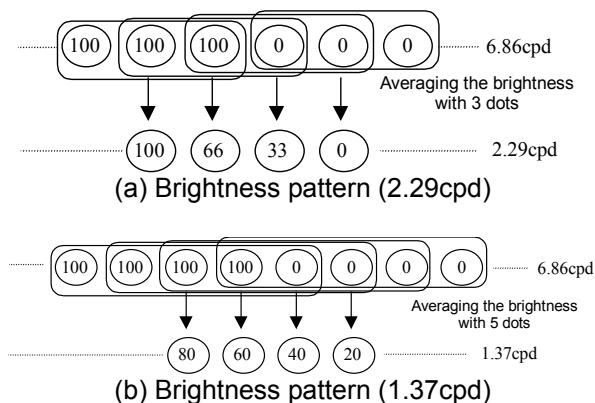


Fig. 3.5 Method of generating patterns with different resolution

Table 3.1 Resolution conditions in high-resolution area and low-resolution area

Resolution Condition No.	High Resolution $R_h$ (cpd)	Peripheral resolution $R_l$ (cpd)
1	6.86	2.29
2	6.86	1.37
3	6.86	0.98
4	2.29	1.37
5	2.29	0.98
6	1.37	0.98

の表示を1サイクルとすれば視野角1度あたり6.86サイクルの縞模様を表示でき、解像度6.86cpdの縦縞が得られる。これを最高解像度の縦縞模様とした。次にFig. 3.5に示すように隣接する左右1画素の輝度を含む3画素の輝度を平均化しそれを中央の位置の画素の輝度とすれば、白と黒のサイクルは、2.29サイクル/度となるので、解像度2.29cpdの縦縞が得られる。以下同様にして隣接する、両側の2画素、3画素の輝度を平均化して、それぞれ解像度1.37cpd、0.98cpdの縦縞模様を作成した。このようにして作成した4種類の解像度を持つ縞模様を用いて、低解像度と高解像度の組み合わせをTable 3.1に示すように6種類設定した。

### 3.3.2 実験手順

実験の手順は、まずFig. 3.4(a)の画像を提示し、被験者には右側の四角枠の中の高解像度領域を注視した後、左の四角枠の領域に瞬時に視線を移動し、注視するように要求した。視線の移動が始まると、視線検出センサの出力変化により移動が検出され、その一定の時間遅れののちFig. 3.4(b)の画像が提示される。Fig. 3.4(b)では、左側の四角枠の周辺のみ、高解像度の縦縞模様で提示される。言い換えれば、被験者が右から左に視線を移すと左側の四角枠の領域の縞模様は、視線の移動直後は低解像度、そしてある時間遅れの後に高解像度の縞模様が提示されることになる。続いて被験者は先ほどとは左右対称に、左から右への視線移動・注視を行う。Fig. 3.6にこれらの画像の提示タイミングを示す。縦軸の「right」「left」はFig. 3.4中の四角枠が提示される左右の位置を示し、横軸は時間軸を示している。図中の実線は視線の、点線は高解像度の画像領域の位置変位を示している。図中のFig. 3.4(a),(b)は、Fig. 3.4(a),(b)のそれぞれの高解像度の画像提示領域の位置のみが左右逆となった画像とする。これらの画像提示の後、被験者には右から左へ、左から右へそれぞれの視線の移動後に注視していた領域の縞模様の見え方についてTable 3.2に示すように3種類の中から回答するように要求した。回答方法は、「回答1」、「回答2」、「回答3」、「やり直し」の4種類の押しボタンスイッチを押すことによって行った。なお「やり直し」は、直前の実験と同じ条件でもう一度Fig. 3.6の手順で行われるもので、視線移動がうまくできなかったり、瞬きなどによって視線検出が誤動作した場合などに、被験者自身が操作するものである。

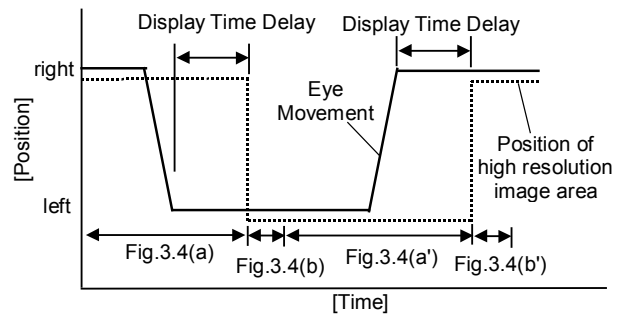


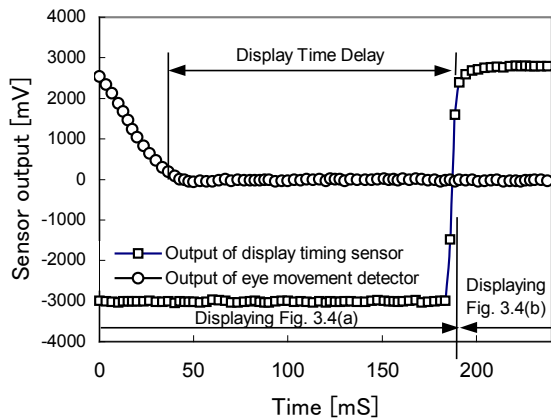
Fig. 3.6 Image display timing

Table 3.2 Responses of subjects

Number	Response
1	The image was seen at high resolution.
2	The low-resolution image was not seen clearly, but the image had changed somewhat.
3	The low-resolution image was seen clearly, and after that the image changed to a high resolution image.

本実験では、視線移動終了から高解像度映像が提示されるまでの時間を提示時間遅れと定義し、この提示時間遅れをパラメータとして、極限法[53]に従って変化させた。十分に大きい提示時間遅れから始め、十分に短い時間にまで変化させつつ、Fig. 3.6の手順を繰り返す下降系列と提示時間遅れを十分に短い時間から徐々に長くする上昇系列の2系列で実験を行った。この際、上昇系列、下降系列とも開始時の提示時間遅れは、あらかじめ予備実験により得られた、十分に大きい、あるいは十分に小さい提示時間遅れの範囲でコンピュータによってランダムに設定される。Table 3.1のそれぞれの解像度条件において、前述した映像提示実験を下降系列、上昇系列でそれぞれ3回ずつ行った。

被験者はあご台によって顔を固定し、実験は右眼だけで行った。被験者は健常な成人男女4名(ランドルト視力0.2,2.0,0.3,1.2(コンタクト装着))で、全員が提示される縞模様を注視状態ではっきりと認識できる。事前に実験手順を理解し、十分に練習をして指標の移動先の位置を記憶してもらった。この実験手順によって得られる視線検出の一例をFig. 3.7に示す。○印は視線検出センサ水平方向の出力、

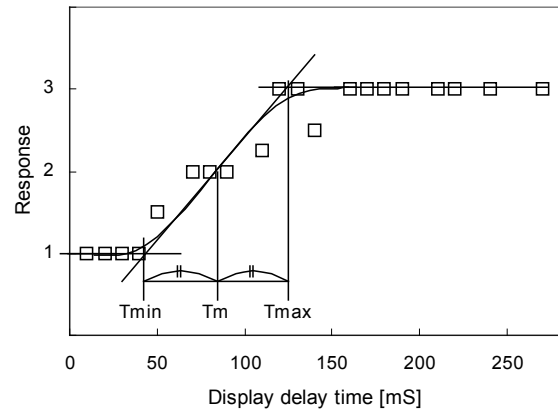


**Fig. 3.7** An example of eye movement detected by sensor (Subject T.T)

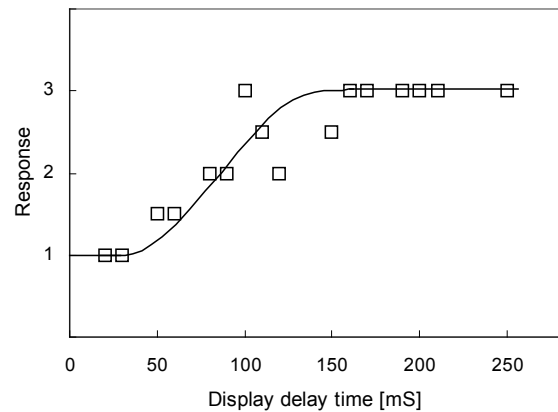
□印は画像表示タイミング検出センサ出力を示している。横軸は時間、縦軸は AD 変換器から取り込まれる電圧をそのまま表示したものである。この図によれば表示タイミングセンサの出力から、ディスプレイ上の表示タイミング検出領域が、黒から白へと変化していたことを示している。すなわち Fig. 3.7 で約 190mS 時点以前は Fig. 3.4(a)の状態、それ以降は Fig. 3.4(b)の画像が提示されていたことを示している。一方、視線移動は約 40mS 時点で終了している。すなわち、この 2 種類のセンサ出力により、視線移動終了から Fig. 3.4(b)の画像が提示されるまでの提示時間遅れは、約 150mS であったことがわかる。

### 3.4 実験結果

Fig. 3.8 は Table 3.1 の解像度条件の No.1 における実験結果の例を示している。Fig. 3.8(a)は下降系列、Fig. 3.8(b)は上昇系列で実験を行った結果である。グラフの横軸は視線移動終了から、注視位置の縞模様が低解像度から高解像度になるまでの時間、すなわち Fig. 3.7 に示した高解像度映像の提示時間遅れを示している。これは実験ごとに記録されたデータから Fig. 3.7 と同様のグラフを作成して算出したものである。縦軸は実験ごとの Table 3.2 に示す回答を数値化したものを示している。この値は 3 回の実験データを 1mS の桁で四捨五入したもの（たとえば、15mS 以上 25mS 未満のデータを 20mS とする）をまとめ、さらに 2.4 節と同じく 1 つの回答 2



**(a)** Resolution condition No.1, descending series, Subject H.H



**(b)** Resolution condition No.1, ascending series, Subject H.H

**Fig. 3.8** An example of experimental results

は、0.5 の回答 1 と 0.5 の回答 3 からなると考え、回答 1,3 にそれぞれ得点 1, 3 を与えて平均値をとったものである。このグラフから多少ばらつきはあるものの、下降系列、上昇系列とも提示時間遅れが大きくなるにつれ、高解像度しか認識できない状態から、中間的な状態を経て低解像度がはっきり見え、その後、高解像度に切り換るのが認識できる状態へと変移していることがわかる。

ここでは、回答 1 および 3 上の水平の直線と 1 から 3 に変移する直線の 3 本の直線に近似する。Fig. 3.8(a)に示すように回答 1 上の水平の直線と回答 1 から 3 に変位する直線の交点の時間を  $T_{min}$ 、回答 3 上の水平の直線と回答 1 から 3 に変位する直線の交点の時間を  $T_{max}$  とすると、その中間点  $T_m$  を以下



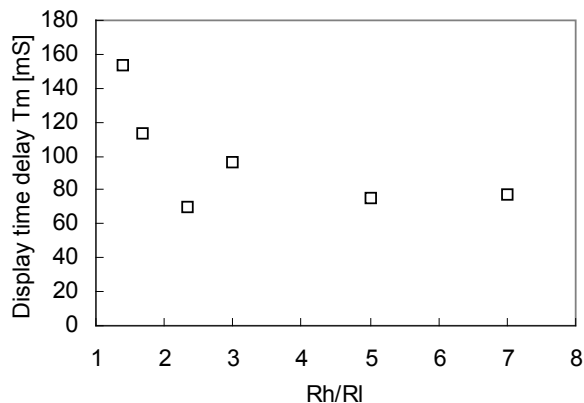


Fig. 3.9 The relation between Rh/Rl and  $T_m$  (subject T.T, eyesight 0.2)

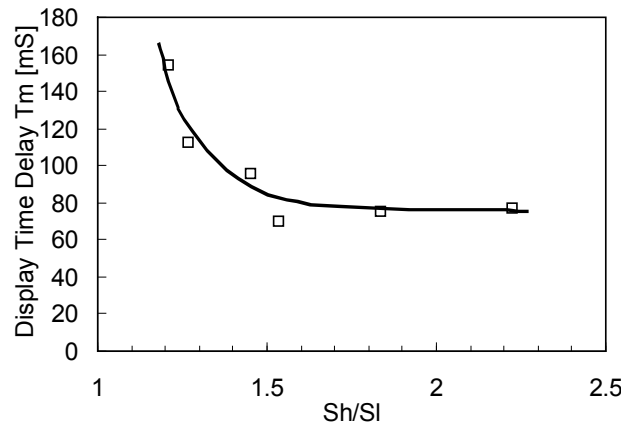


Fig. 3.10 The relation between Sh/SI and  $T_m$  (subject T.T, eyesight 0.2)

のように定義する.

$$T_m = (T_{max} + T_{min}) / 2 \quad (3.1)$$

Fig. 3.9 は各解像度条件毎に、上昇下降系列各 3 回計 6 回の実験データを合わせて Fig. 3.8 と同じデータ処理により算出した提示時間遅れ  $T_m$  と高解像度と低解像度の比率  $Rh/Rl$  との関係を示したものである。ここで、Fig. 3.9 の関係をより明瞭にするために、感覚量  $S$  を用いる。解像度  $R$  はある程度より高くなると人はその違いの認識が困難になるので、ここでは感覚量は刺激量の対数に比例するというフェヒナーの法則[53]に従って以下のように定義する。

$$S = k * \log(R / R_0) \quad (3.2)$$

(ただし  $k$  : 定数,  $R_0$  : 刺激閾値)

仮に  $k = 1.0$ ,  $R_0 = 0.2$  として刺激量  $Rh$  に対応する感覚量を  $Sh$ ,  $Rl$  に対応する感覚量を  $Sl$  とし、その比  $Sh/Sl$  を横軸、提示時間遅れ  $T_m$  を縦軸として実験結果を整理すれば Fig. 3.10~3.13 のようになる。本来なら最適な  $k$  や  $R_0$  について検討するべきであるが、ここでは、実験結果の傾向を得るために適当な値を選ぶにとどめた。 $Sh/Sl$  を 1 に近づければ  $T_m = \infty$  となることは容易に予想できる。一方  $Sh/Sl$  を大きくすれば 4 名の被験者とも  $T_m$  は減少していく傾向が認められる。なお実験データのばらつきを調べるため、Fig.3.12 の被験者について中心部 6.86cpd,

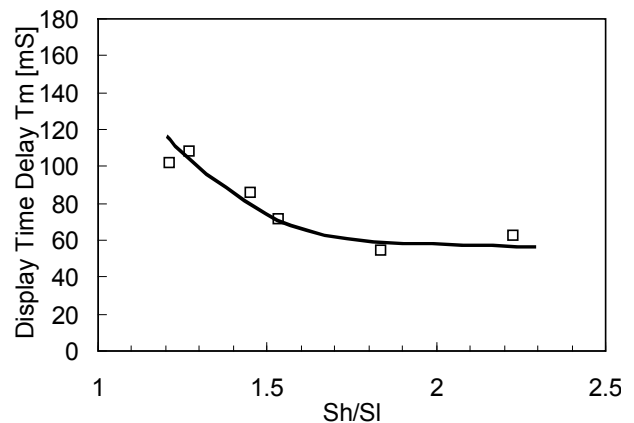


Fig. 3.11 The relation between Sh/SI and  $T_m$  (subject H.H, eyesight 2.0)

周辺部 1.37cpd の条件にて、下降・上昇系列 15 往復の実験を行った。これは本章の Table3.1 空間周波数条件 No.2 であり、 $Sh/Sl = 1.84$  である。これは後述するが視力 1.0 相当(30cpd)の映像提示を実現する際の  $Sh/Sl=2.01$  に最も近い実験条件を Table3.1 の中から選んだ。また計算には、下降・上昇系列 1 往復ごとに提示時間遅れ  $T_m$  を算出し、得られた 15 標本から評価した。その結果得られた許容できる時間遅れの平均値は 79.2mS, 標準偏差 6.52 となり、Fig.3.12 にその値を示した。

仮に NTSC 方式のディスプレイデバイスを用いてランドルト視力 1.0 相当(30cpd)の映像提示を想定し、高解像度映像の幅 9 度(29.16cpd), 広視野映像の幅 110 度(2.39cpd)の組み合わせの映像を提示した

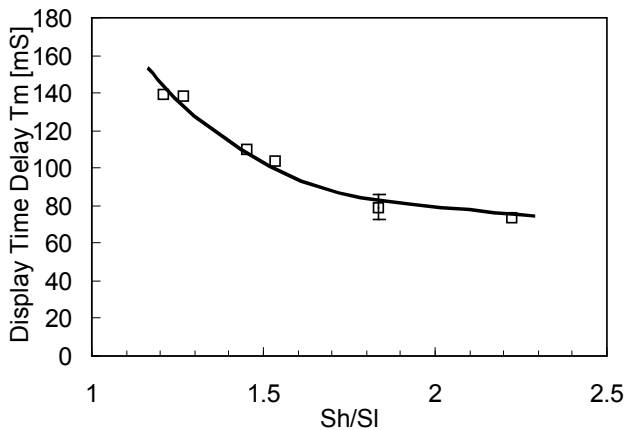


Fig. 3.12 The relation between  $Sh/SI$  and  $T_m$  (subject K.I, eyesight 0.3)

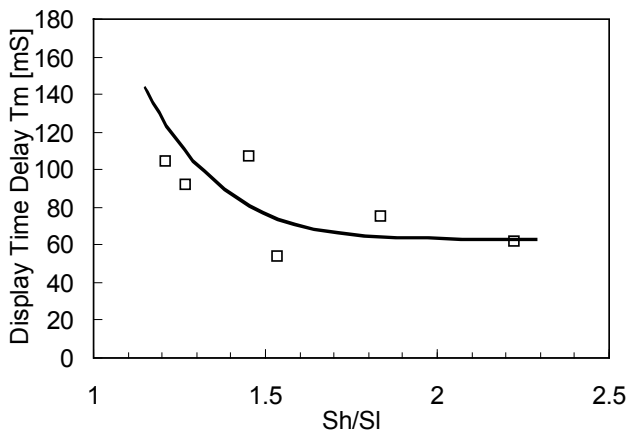


Fig. 3.13 The relation between  $Sh/SI$  and  $T_m$  (subject N.Y, eyesight 1.2)

とすると、 $Sh/SI=2.01$ であり、Fig. 3.10～3.13 から許容できる時間遅れは約 60～80mS であることがわかる。これは、前述の他のサッカード抑制の実験でサッカード後に短時間提示される光点や色刺激が十分に検出できない時間帯と一致している。

### 3.5 結言

本章では、視線追従型映像提示システムを構成する場合に問題となる高解像度映像を視線追従させる際の許容できる追従時間遅れを調べた。コンピュータグラフィックスによって生成された縞模様画像を視線移動に対してある時間遅れをもって提示する評価実験を行い、視線追従型映像提示システムを設計するために必要な、視線追従に対して許容できる映像提示時間遅れに関する基礎データを明らかにした。

結果をまとめると以下ようになる。

- ①映像提示時間遅れの評価実験結果をもとに物理量である解像度を感覚量に変換し、より広範囲の解像度に対応した提示時間遅れ  $T_m$  の変動傾向を導いた。
- ②NTSC ディスプレイを用いて 110 度の視野角でランドルト視力 1.0 相当の映像提示を行う場合、被験者が視線を移した後それが違和感なく高解像度であると感ぜられるためには、サッカード終了後、60-80mS 以内に高解像度映像が注視点に提示される必要がある。

また、システムを実用化していく段階では、実環境画像など提示画像の種類や視線の移動量や移動方向、個人差など様々な条件において許容時間遅れを評価していく必要がある。

## 第 4 章 映像提示システムの開発

### 4.1 緒言

本章では、視線追従型映像提示システムを具体化するために必要な、注視点近傍に高解像度映像を提示する方式を提案するとともに、その試作機を設計し、単純映像を対象とする実験によって提案方式の映像提示手法の妥当性を確認した結果を述べる。

視線追従型映像提示システムを具体的に構成する際、概念で述べたようにディスプレイを視線に応じて直接動かすことは適切ではない。よく知られているように眼球運動には滑動性眼球運動、断続性眼球運動の 2 種があり[29][30]、特に後者は最大速度 300 度/秒にもなるといわれ、この速度に追従してディスプレイを駆動することは困難である。そこでディスプレイ自体を移動させることなく、高解像度映像提示位置を制御する手法を検討する必要がある。このような制御は、いくつかの光学的手段により実現可能である。本章では 3 種の映像提示位置制御方式を考案し、それらを比較検討して、視線追従型映像提示システムの用途に最も適した方式を選定した。以下にその選定のプロセスを述べる。

### 4.2 方式の検討

#### 4.2.1 プリズム方式[54]

視線追従型映像提示システムを実現する一方式としてプリズムを用いる手法を Fig. 4.1 に示す。この方式ではまず眼前にハーフミラーを含むプリズムと、その背後に球面ハーフミラーを置く。また、その上方に 2 軸の走査ミラー、球面ハーフミラー後方には全視野をカバーする広視野ディスプレイ、走査ミラー側方には注視点周囲の映像を提示する高解像度ディスプレイを配置する。観測者がプリズム・球面ハーフミラーを通して、広視野ディスプレイ上のある場所を注視すると、まず、眼球センサにより注視点が計測され、その情報に応じて、注視点近傍の映像が高解像度ディスプレイに表示される。同時に、走査ミラーの向きが制御され、高解像度ディスプレイの映像が、プリズム内に投

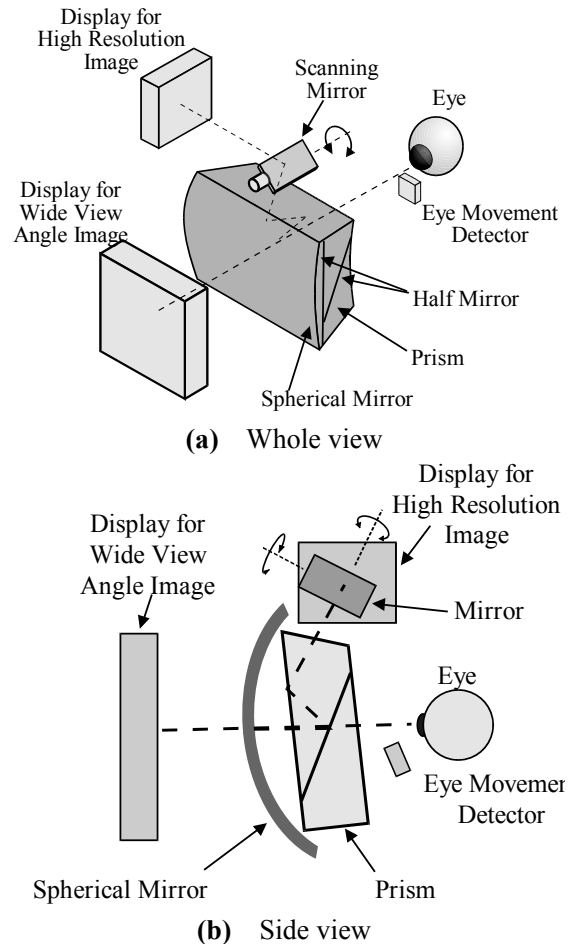


Fig. 4.1 Prism type display

射される。プリズムの内部には 2 枚のハーフミラーが内蔵されており、投射映像は、図に示すように、ハーフミラーで数回の反射・透過を経て、広視野ディスプレイ上の注視領域に対応する球面ミラー上に投影される。観察者は、この球面ミラー上の映像を広視野ディスプレイの映像と重ね合わせて見ることにより、1 章の提案システムが与える映像と同様な特性を持つ映像を観測することができる。

#### 4.2.2 楕円鏡方式[55]

視線追従型映像提示システムのコンセプトは楕円鏡を用いても実現し得る可能性がある。Fig. 4.2

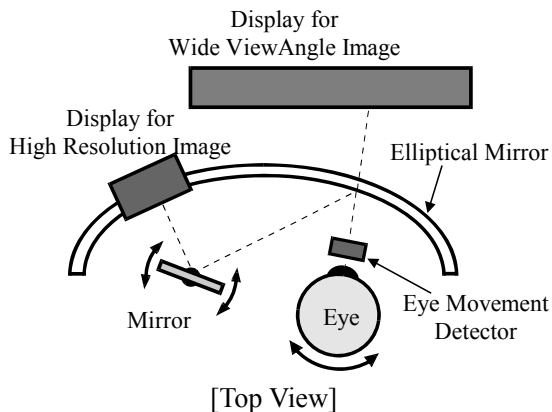


Fig. 4.2 Elliptical mirror type display

に楕円鏡方式のアイデアを示す。この方式では図に示すように、楕円鏡を観測者の眼球および走査ミラーがそれぞれの焦点に一致するように、また、高解像度ディスプレイを楕円鏡上に図のように配置する。楕円鏡には、一つの焦点から出た光は、もう一つの焦点に集まるという性質がある。そこで、観測者が Fig 4.2 に示すように広視野ディスプレイ上のある位置を注視したとき、それを眼球センサーで検知して、その注視領域の映像を高解像度ディスプレイ上に表示すると共に、走査ミラーの向きを制御して、広視野ディスプレイの注視領域に対応する楕円鏡上の位置に、高解像度ディスプレイ映像を投影する。観測者は、この楕円鏡上の高解像度ディスプレイ映像と広視野ディスプレイ映像を重ね合わせて見ることにより、1 章で提案するシステムが提示する映像と同様の特性を持つ映像を観測できる。

#### 4.2.3 前方投射方式

Fig. 4.3 に前方投射方式の構成を示す。システムの基本構成は接眼レンズ、走査ハーフミラー、広視野および高解像度ディスプレイ、画角調整用レンズ、眼球センサーから成る。まず、観測者は接眼レンズおよび走査ハーフミラーを介して、広視野ディスプレイに映し出される広視野映像を観測する。そしてこの時の注視位置を眼球センサーで検出し、上記 2 つの方式同様、高解像度ディスプレイ上に、注視領域の映像を表示する。一方、また、眼球センサー出力に応じて、走査ミラーの角度を制御し、広視野ディスプレイの注視領域に対応する

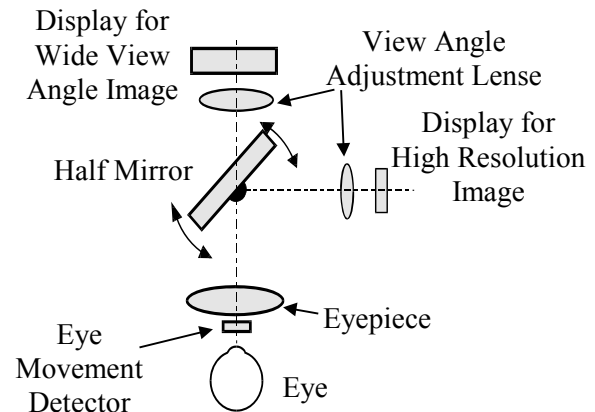


Fig. 4.3 Front project type display

走査ハーフミラー上の位置に画角レンズで大きさの調整された高解像度ディスプレイの映像を提示する。この映像を接眼レンズを介して、広視野ディスプレイ映像と重ね合わせて見ることにより、提案するシステムが提示する映像と同様の性質を持つ映像を得ることが出来る。

#### 4.2.4 各方式の検討

上記の各方式を比較選定するに際しては、より広視野で、高解像度の映像が提示できる方式に注目することは無論であるが、臨場感の高い映像提示系を得る意味では、十分な明るさを持ち、かつ歪のない映像が提示できる方式を選定することも重要である。また、実用に共するためには、製作が容易なこと、そして、最終的に HMD への適用を考えれば、コンパクト化が可能なることも重要な選定基準となろう。これらの項目に留意して、各方式の比較評価を行った。

まず、提示映像の明るさは、ディスプレイ上に表示された映像が観測者の目に達するまでの光路長や、光路中に存在するハーフミラーおよびレンズ等による光の減衰の度合いに依存する。プリズム方式は、光路長が比較的長く、かつ走査ミラーより投射された映像がプリズム内で複雑な反射を繰り返すため、提示映像の十分な輝度を確保することが困難である。このことは試作した実験モデルに高解像度ディスプレイとして高輝度のものを用いてもなお提示映像の十分な輝度を確保することが困難であることが、被験者 2 名を用いた主観的判断による評価実験によって確認された。また、

プリズム周辺領域においては画像歪みが大きくなり、十分な解像度を確保することが困難であり、さらに歪みの少ないプリズムの製作にコストを要すると共に、プリズム上部の走査ミラーの設置スペースが観測者と干渉するため狭く、コンパクトな走査ミラーを選定しなければならないことにも課題があることが判明した。

一方、楕円鏡方式は、光路が短く、光の減衰の点では、プリズム方式に見られるような問題点はない。しかし、走査ミラーや眼球に投影する映像を、正確に焦点上に結像させないと、楕円鏡の性質上像がぼやけて、十分な解像度の映像が提示できないという問題がある。すなわち Fig. 4.2 に示す楕円鏡型ディスプレイにおいて、仮に高解像度ディスプレイの中心部に点光源が配置されているとすると、その光は図中の点線に示す光路を通り眼球に投影されるため、問題は発生しない。しかし高解像度ディスプレイから投影される映像や画像のような面光源が配置された場合には、面光源の中心部以外は歪みが常に発生し、その歪みかたは、視線位置、すなわち楕円鏡上の提示位置によっても変化するため、その補正は極めて困難と思われる。さらにこの方式では、面光源の中心部以外は視線位置によって、眼球までの光路長が変化するため、高解像度映像光軸上に光学レンズを配置して画角調整などの対策をとる場合、映像のぼけなどに対する対策も必要となる。また、走査ミラーや眼球を正確に焦点上に配置することも困難なことや楕円鏡の製作が容易ではなく、かつコストを要するという生産技術上の問題も推測される。

前方投射方式は、プリズムや楕円鏡といった特殊な光学要素を使わずに構成できることに特徴がある。また、高解像度映像を眼球正面から投影することが出来るため、プリズム方式に見られるような走査ミラー設置スペースの問題もない。映像の光路長も比較的短く設計できるため、映像の輝度の低下も少なく、映像歪みに関しても、それを低く抑える画角調整レンズの設計は、プリズムや楕円鏡よりも低コストでかつ技術的にも容易である。

以上視線追従型映像提示システム実現のための3方式について検討を行った結果、前方投射方式が、製作面や性能面において、他の2方式よりも優れていると判断し、この方式を採用することとした。以下では前方投射方式視線追従型映像提示システムの具体化について述べる。

### 4.3 試作システムの構成

前節での検討結果に基づき、前方投射方式の設計を行った。Fig. 4.4 にその光学系を示す。広視野ディスプレイ、画角調整用レンズ  $f_1, f_2$ 、走査ハーフミラーおよび接眼レンズ  $f_5$  は同一光軸  $l$  上に配置されている。一方、ハーフミラー中心を通り、光軸  $l$  と直交する方向の光軸  $m$  上に、高解像度ディスプレイ、画角調整用レンズ  $f_3, f_4$  が配置されている。映像提示に際してはまず、広視野ディスプレイより像  $O_1$  を提示し、それを画角調整用レンズ  $f_1, f_2$  により広視野映像用に画角を拡大調整した後、走査ハーフミラー後方に像  $O_2$  を結像させる。一方、注視点近傍の映像を提示する高解像度ディスプレイの像  $O_3$  を、レンズ  $f_3, f_4$  により高解像度映像用に縮小調整した後、走査ハーフミラーにより角度を変え、像  $O_2$  と同じ平面上に結像（像  $O_4$ ）させる。ここで、像  $O_1$  と像  $O_3$  の生成には同一のディスプレイを用いるが、前節でも述べたように、各々の像が画角調整レンズにより拡大・縮小されるため、像  $O_4$  には像  $O_2$  のそれよりも高解像度な映像が形成される。用いたディスプレイの大きさは5.3インチで、広視野、高解像度視野角は水平・垂直方向共にそれぞれ46度、14度であり、結果として、注視点近傍の映像の解像度は周辺領域に対し、約3倍となる。人は、上記の同一平面に形成された2つの像を、解像度の異なる2つの像の重ね合わせ映像として、接眼レンズ  $f_5$  を介して観測する。

人の視覚系はおよそ水平100度、垂直80度の視野を持つ。従って、上記の広視野映像の視野角の仕様は、人の視野をカバーするには不十分である。この問題は市販レンズを用いたことによるが、本研究では、提案する映像提示方式の機能の確認を主眼としたため、試作システムで十分と考えた。この広視野映像の視野角はレンズ系を特別に設計することにより、人の視野をカバーする程度に拡大することは技術的に可能である。また、高解像度映像の視野角も同じく画角調整用レンズの焦点距離および位置を調整することによって変更可能である。

さて、本システムでは、高解像度ディスプレイに注視位置の映像を常に表示し、かつそれを注視位置に投影しなければならない。これを実現する

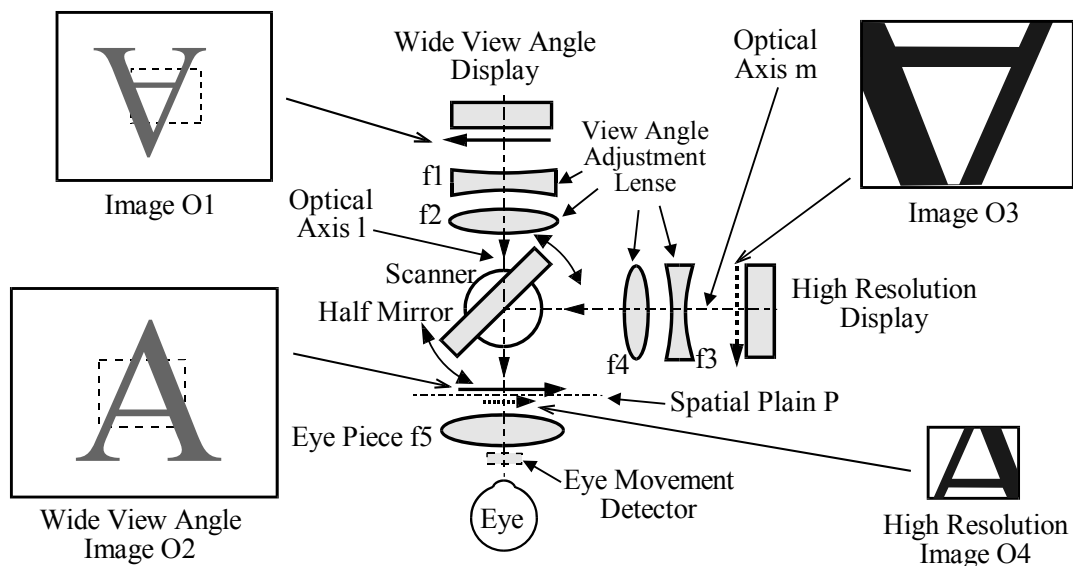


Fig. 4.4 Optical system

ために以下の映像提示制御系を構成した。すなわち、まず、接眼レンズ  $f_5$  と眼球との間の視野を妨げない位置に、眼球の運動を検出するセンサを設置し、それによって検出した眼球の運動に応じて、走査ハーフミラーの角度を制御することによって、像  $O_2$  の結像面上の視線が向いている位置に像  $O_4$  を投影した。ここで視線検出センサには市販品（竹井機器製）を用いている。このセンサは赤外 LED とフォトダイオードから構成されており眼球に赤外光を照射し、黒眼と白眼の反射率の差を利用して、視線位置が検出される。また以上のミラー制御を行う時ことにより、人の視線は結果的に眼球の動きによらず高解像度ディスプレイの中心に拘束されることになる。眼球が運動し広視野上の注視位置が変化した場合、高解像度ディスプレイにはその注視位置の映像が提示されなければならないから、高解像度ディスプレイに表示される映像は眼球運動に応じて逐次計算機のプログラムによって更新される。試作装置では、原理の確認に目的を絞るために構成を単純化し、走査ハーフミラーは水平方向の 1 自由度とし、視線の水平方向の移動に対してのみ映像制御を行った。Fig. 4.5 に高解像度映像提示系の詳細構造を示す。高解像度ディスプレイに表示される画像を常に視線方向に提示するために、Fig. 4.5 中のミラーの姿勢を眼球位

置に対し次の関係を満たすように制御した。

$$\alpha = \tan^{-1}(L_2 / L_1 \times \tan a) \quad (4.1)$$

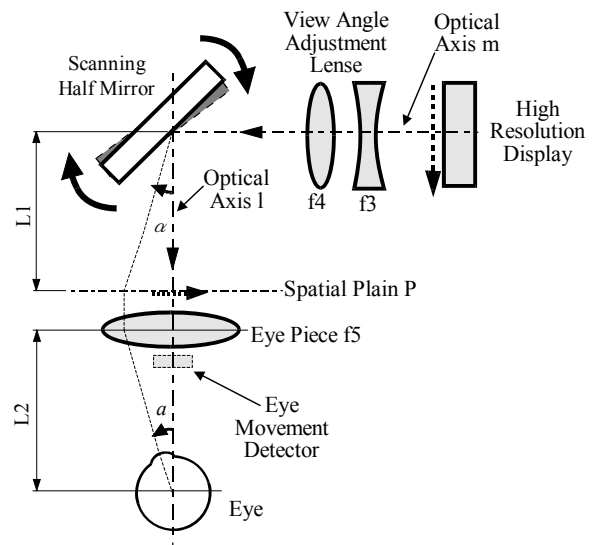


Fig. 4.5 Relation between  $a$  and  $\alpha$

ここで、 $a$ は光軸 1 からの視線の振れ角で、視線検出センサによって計測される量である。また  $\alpha$ は、光軸 1 からの高解像度映像軸の振れ角であり、制御される走査ハーフミラーの振れ角の 2 倍に対応する量である。 $L_1$ は光軸 1 と m の交点から高解像度映像が結像する空間平面 P までの距離、 $L_2$ は眼球から接眼レンズまでの距離である。なお本実験装置においては、 $L_1 = 120\text{mm}$ 、 $L_2 = 60\text{mm}$ である。また前述のように広視野、高解像度映像の視野角はそれぞれ 46 度、14 度であることから、高解像度映像が広視野映像領域内を移動するためには、 $a = 0 \sim 16$  度の値をとる必要があり、その結果(4.1)式より  $\alpha = 0 \sim 8.2$  度の範囲で変化する。

走査ハーフミラーの制御と映像の更新は、高解像度ディスプレイの映像とそれがスーパーインポーズされる場所の広視野ディスプレイの映像とが常に一致する広視野ディスプレイの提示映像を乱さないように行わなければならない。これを実現するためには、注視位置の広視野の映像を眼球運動に応じて正確に高解像度ディスプレイを介して提示することが求められるが、ミラーの回転や映像は時間 0 で更新できないから、これを厳密に実現することは困難である。すなわち、ミラー回転や画像更新の過度期間中に高解像度領域に提示されるべき映像内容とそれがスーパーインポーズされるべき場所の広視野ディスプレイ映像の間に違いが生じ、このような状態で、広視野ディスプレイ上に高解像度映像がスーパーインポーズされると、その境界部分で映像にずれ映像に乱れが生じることが避けられない。そこでこの問題を回避するために、過度期間の画像の提示を遮断する方式を導入した。すなわち、ディスプレイの垂直同期信号 (60Hz) に同期して、作動するシャッター機構を用い、画像の更新、ミラー回転の期間中は画像を一時期遮断する。シャッター機構には、Fig. 4.6 中に示すような、映像の遮断・透過を可能にする透明部と遮蔽部を持つ円盤を速度制御可能なモーターに取り付けたものを用い、高解像度ディスプレイの画角調整レンズと走査ハーフミラーの中間に配置した。

システムのタイミングチャートを Fig. 4.7 に示す。まず、初期状態ではシャッターは開放状態にある。システムは最初の垂直同期パルス信号を受けると、視線位置の検出とそれに基づく高解像度映像データの更新を行う。また、2 つ目のパルスで、

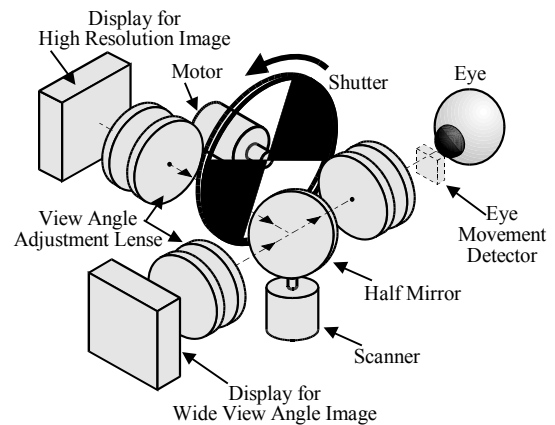


Fig. 4.6 Experimental setup

シャッターを閉じ、ミラーを回転させるとともに、更新映像をディスプレイに書き込む。3 つ目のパルスで、シャッターを開き、映像を提示すると共に、次に備えて、視線方向の計測と映像データの更新を行う。4 つ目のパルスで、再びシャッターを閉じ、ミラーの回転角を制御すると共に、更新データのディスプレイへの書き込みを行う。以下、前記 3 つ目のパルス以降の動作を繰り返す。試作したシステムでは、以上の説明からも明らかなように、高解像度映像はシャッターによる 1/30 秒の開閉周期で表示される。この提示速度は、被験者 2 名を用いてシャッター開閉周期を変化させつつ、シャッターを周期的に開閉させて画像の明るさを主観的に評価する実験を行った結果、開閉周期が 1/26~1/27 秒よりも高速の場合には明るさの連続性には影響

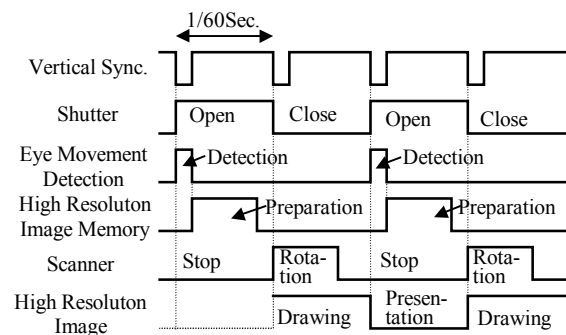


Fig. 4.7 Timing chart of high resolution image presentation

を与えないことが確認された。すなわち上記の 1/30 秒の周期は人の視覚系の残像特性から考えて、映像の連続性を十分保証し得るものである。またシャッタ機構の円盤の回転はフォトインタラプタによって回転位置を検出し、PLL 回路を用いて、映像の遮断・透過と垂直同期信号のタイミングが一致するように制御した。映像の制御、シャッタおよび走査ハーフミラーの制御はパーソナルコンピュータ(PC9801 日本電気社製)を用いた。また走査ハーフミラーの位置制御にはオープンループ型のスキャナを使用した。

Fig.4.8 に制御システム全体の構成を示す。試作システムは、その構成部品であるレンズ、ハーフミラーを含む光学系および 2 つのディスプレイ等をスタンドを介して、水平な基盤の上に適切に配置して構成した。また、接眼レンズの手前には、顎台を設置し、被験者には、この台上に顎をのせ

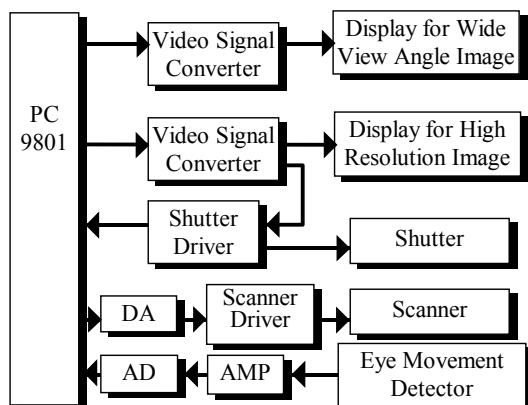


Fig.4.8 Control system



Fig.4.9 Experimental setup

て映像を観測させた。Fig.4.9 に装置全景を示す。

## 4.4 評価実験

提案した前方投射方式によるシステムの妥当性を確認するために、高解像度提示系に注目して、機能評価を行った。機能評価では、まず眼球運動に対するミラーの追従性の実験を行い、この機能を保証した上で、上述した眼球運動に基づくミラーの制御方式や映像の制御系が安定な高解像度映像を提示することに効果的か否かを心理物理的実験手法を用いて評価することを試みた。

### 4.4.1 ミラー追従特性の評価

走査ハーフミラーの駆動系は、視線すなわち眼球の移動速度に十分追従し得る応答特性を備えていなければならない。本システムでは、Fig. 4.7 のタイミングチャートに示されるように、1/30 秒毎に走査ハーフミラーは駆動され、この 1 周期 1/30 秒のうち半分の 1/60 秒間は高解像度映像の提示期間、残りの 1/60 秒は走査ハーフミラーの駆動期間となる。視線の最高速運動であるサッケードは約 300 度/秒であるが、ここで仮に視線が最高速の 300 度/秒で移動したとすれば Fig. 4.5 に示す視線の振れ角  $\alpha$  は 1/30 秒で 10 度変化することになる。この場合、高解像度映像が視線追従して提示されるためには、高解像度映像軸の振れ角  $\alpha$  は走査ハーフミラーが駆動される 1/60 秒の間に、(4.1)式に従って少なくとも  $\tan^{-1}(L_2/L_1 \times \tan \alpha)$ 、 $\alpha=10$  度は回転しなければならない。この点を評価するために、以下に示す確認実験を行った。まず、広視野ディスプレイの中心から右側に視線振れ角  $\alpha=5$  度の位置に指標を提示し、続いて瞬間的に指標を広視野ディスプレイの中心から左側に視線振れ角  $\alpha=5$  度の位置に移動させ、これら指標を被験者に注視させたときの眼球運動の測定結果に基づき、(4.1)式にしたがって、走査ハーフミラーを駆動し、その応答を記録した。ミラーの角度の測定には、レーザ距離センサを使用した。結果として、視線の振れ角  $\alpha$  の 10 度の変化に対応した高解像度映像軸の振れ角  $\alpha$  の回転は、駆動開始から終了まで 10mS 程度で終了することが確認された。これは 1/60 秒 (約 17mS) に対し十分小さく、このことから仮に眼球が最高速の 300 度/秒で視線移動したとしても



高解像度映像の視線追従は可能であることが確認された。さらにサッケードの視線移動中には人間の視力は低下し、視線移動終了後、視力回復までに 200~400mS を要する[30]という人間の視覚特性を考慮すれば、走査ハーフミラー制御系は安定な映像提示に必要な十分な追従能力を有していることがわかる。また上記の実験で得られたミラー追従特性は視覚センサの特性も含むものであり、したがって以上の結果から視覚センサの応答特性も十分なことがあわせて確認される。

#### 4.4.2 高解像度映像制御系の評価

##### 4.4.2.1 実験方法

構築した前方投射方式システムにおいて、安定に高解像度映像が提示されるかを以下のようにして評価した。すなわち、まずサンプル映像として、固定された指標が存在する映像を取り上げる。この映像を試作システムで被験者が観測するとき、画面の任意の位置(本研究の試作システムの場合、視線の水平移動のみ考慮しているので、厳密には水平方向の任意の位置)に注視点を移動させると、当然高解像度ディスプレイはその注視点位置に応じて、異なった映像を提示する。この注視点を変化させて映像を観測する被験者が、提示される指標が常に固定されているように感じるならば、提示系の性能がほぼ確認されることになる。本実験では、これを心理物理的方法により確認するために、前節で述べた視線計測に基づく高解像度映像の制御を行った場合と、一部高解像度映像制御則を乱して高解像度映像提示を行った場合とを比較評価させることを試みた。Fig.4.10(a)に、用いた提示映像を示す。いま被験者が点Aを注視している時、実線で囲まれた領域が高解像度ディスプレイによって高解像度で提示される。次に被験者が点Bを注視したとすると、高解像度映像領域は視線移動にともない、点線で囲まれた領域が高解像度映像領域となる。ここで Fig. 4.5 で定めたように視線の振れ角を  $\alpha$ 、高解像度映像軸の振れ角を  $\alpha$  とすると(4.1)式から提示映像面上の注視点の移動量は  $L_2 \times \tan \alpha$ 、高解像度映像中心の移動量は  $L_1 \times \tan \alpha$  であり、この2つの移動量は常に等しくなるように制御されなければならない。このとき高解像度映像の提示内容と提示位置を一致させ映像を乱さないで提示するには、高解像度ディスプレイ上において指標が視線移動と反対方向に移動するよ

うに映像を書き換える必要がある。Fig.4.10(b)(c)は、被験者が点AおよびBを注視している時の高解像度ディスプレイの提示映像の様子をそれぞれ示している。映像が Fig.4.10(b)から(c)に移行するときの指標の移動量を  $D$  とするとき、次式を満たすように、映像の書き換えを行えば、理論的には提示映像面上の指標が固定されて見えるはずである。

$$D = -L_1 \times \tan \alpha \quad (4.2)$$

こうして提示される映像を一つの刺激提示映像とした。これに、上式に変数  $x$  を導入した次式において、

$$D = -x \times L_1 \times \tan \alpha \quad (4.3)$$

$x$  を 0.8, 0.9, 1.1, 1.2 とし指標の移動量  $D$  を制御した4つの映像を加えた合計5つの刺激提示映像をランダムに提示して、被験者に指標の移動が感じられるか否かを判定させた。刺激の提示回数は50回である。実験は高解像度映像の書換えと走査ハーフミラー角度の制御タイミングの一致の確認に目的を絞り、広視野ディスプレイには、なにも表示しない状態で行った。以上の実験はすべて試作システムを用い、被験者を顎台上に固定した状態で行った。被験者数は2名である。

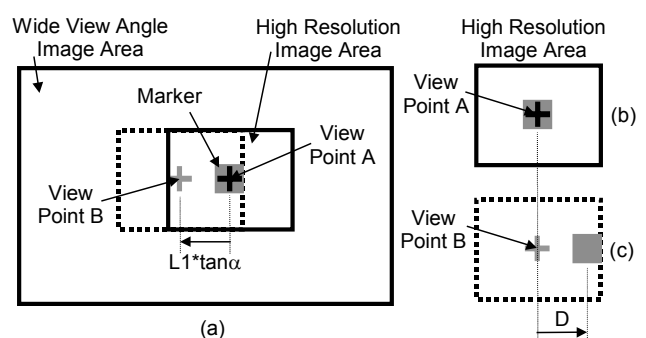


Fig. 4.10 Visual environment of experiment

##### 4.4.2.2 実験結果と評価

Fig. 4.11, 4.12 に結果の一例を示す。各被験者ともほぼ同様の傾向を示した。縦軸は  $x$  の各値毎に10回の試行で得た回答から得られた値を示す。こ

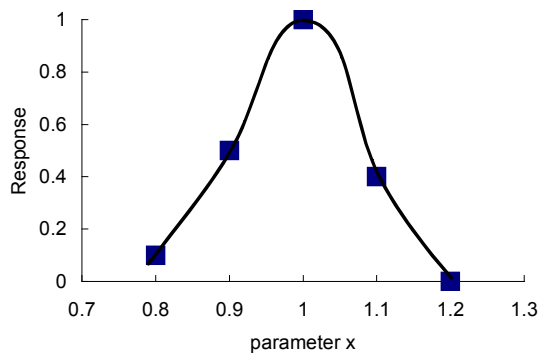


Fig. 4.11 Experimental result (Subject H.T)

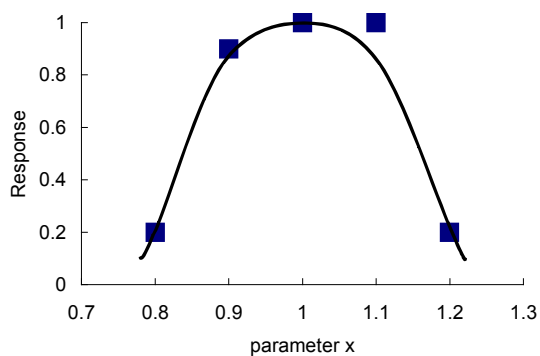


Fig. 4.12 Experimental result (Subject K.O)

の値は、指標が完全に停止し、かつ指標の振動も感じられないと回答した確率を示している。この図から両被験者とも  $x = 1.0$  のとき、すなわち(4.2)式の関係を満たすように走査ハーフミラーを視線に対し制御したときに、ほぼ 100%の「指標は静止している」との回答が得られ、かつまた  $x = 1.0$  の周辺部では、両者の結果には多少の差はあるものの、 $x = 1.0$  に近いほど「指標は静止している」と答える率が高くなる傾向が認められることがわかる。以上から、高解像度ディスプレイ系の光学系、駆動系、センサ系などの各要素が期待通りに機能していること、および提案した前方投射システムの映像制御の妥当性が確認される。

#### 4.5 結言

本章では、視線追従型映像提示システムの具体的構成法を提案した。広視野高解像度映像提示の3種類の実現方法について検討を行い、前方投射方式の有効性を指摘するとともに、実験システムを試作してその高解像度映像提示系の評価を行った。まず走査ハーフミラーの応答特性を測定し、それが視線の移動速度に十分追従し得るものであることを確認した。さらに高解像度映像を視線に応じて制御する手法の妥当性を心理物理的実験により確認した。

## 第5章 映像撮像・提示システムの統合

### 5.1 緒言

本章では、4章で試作検討した映像提示システムの高解像度映像を垂直方向にも視線追従可能にする、光学系の検討・試作を行う。またその提示装置に対応した実環境映像を取得するための撮像システムを設計試作し、提示システムと統合したシステムを構築する。そして単眼システムにおける高解像度映像の取得と提示について検討し、実環境映像を用いて評価実験を行った結果を述べる。

### 5.2 視線追従型映像撮像・提示システム

#### 5.2.1 システム光学系の2次元化

4章で試作した映像提示システムは、高解像度映像が、水平方向にのみ視線追従可能だったが、ここでは、それを垂直方向にも拡張する光学系について検討する。

##### 5.2.1.1 システム構成の検討

視線追従型映像提示システムの実現するためには様々な方式が考えられる。しかし1章で示した概念図のように高解像度映像用ディスプレイを視線移動にあわせて高速に移動させることは難しい。そこで我々は、4章で述べたよ

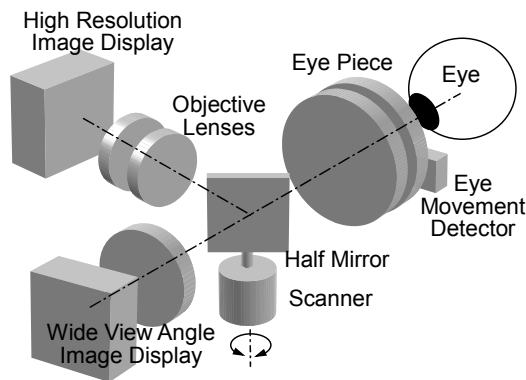
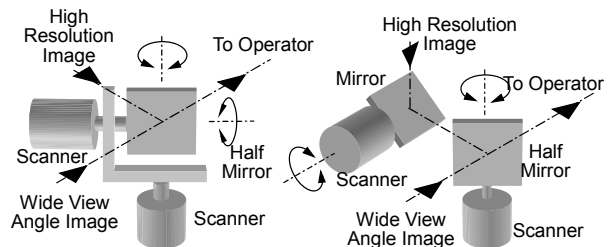


Fig.5.1 Proto-type Display System

うにプリズム方式、楕円鏡方式、前方投射方式の3種類の映像提示位置の制御方式を考案し、検討を行った。その結果、製作面や性能面の優位さから前方投射方式を選択し、Fig.5.1に示すような高解像度映像を水平方向に制御可能なシステムを試作した。

しかし高解像度映像を常に視線に追従させるには、映像を水平だけでなく垂直方向にも制御する必要がある。そのためには、ミラーの角度を制御するアクチュエータが2つは必要になる。それを具体化する方式としてFig.5.2に示すようなジンバル方式と軸別方式を検討した。ジンバル方式は、1枚のミラーの支持軸をジンバル構造にして、2軸化したものである。この方式ではハーフミラーと2つのスキャナから構成されており、ハーフミラーの角度を2軸周りに制御することが可能である。しかし、この方式では映像の移動に伴い、映像自体の回転が発生する問題があり、対策として高解像度映像用ディスプレイ自体が回転する機構を追加するなどの工夫が必要となる。一方、軸別方式は、水平制御用・垂直制御用のミラーが独立に存在し、それぞれのミラー角度をスキャナによって制御するものである。この方式では2つのスキャナにそれぞれ接続されているミラー、ハーフミラーの角度を制御することによって高解像度映像の水平・垂直方向への移動をそれぞれ別々に、制御でき、映像の回転も発生しない。そのような制御の容易さを考慮し、本システムでは軸別制御方式を採用した。



Gimbals Structure      Each Axis Control  
Fig.5.2 Structures of 2 dimensional axis control

また、視線検出センサについても様々なものが考えられる[56-61]。ここでは Fig.5.1 のように赤外 LED を照明としてフォトダイオードで検出する方式と、同じく赤外 LED を照明として CCD カメラで検出する方式について検討した。フォトダイオードを用いる方式は、白眼と黒眼の境界で反射光をとらえる方法(強膜反射法)を利用している。この方法は赤外光を眼球に照射し、その反射光をフォトダイオードで受光する。黒目が移動した時のフォトダイオードの受光量の変化を検出することによって視線位置を検出するものである。この方法は、視線検出処理が高速であるなどの長所があるが、キャリブレーションが必要であること、センサと眼球との位置関係が少しでもずれると大きく測定精度が落ち、さらに、原理上測定範囲が±20 度程度であること等の問題がある。一方 CCD カメラを用いる方式は、入力された眼の画像をもとに画像処理によって視線方向を算出するものである。この方式は眼の映像を取得して視線方向を算出する場合のように眼の形状や大きさがあらかじめ明らかかな場合は、フォトダイオードを用いる場合よりも広範囲の視線検出にも対応でき、キャリブレーションも簡素化でき、装置と眼との位置関係のズレにも対応できる等の利点がある。そのため本システムでは CCD カメラを用いて視線検出を行った。

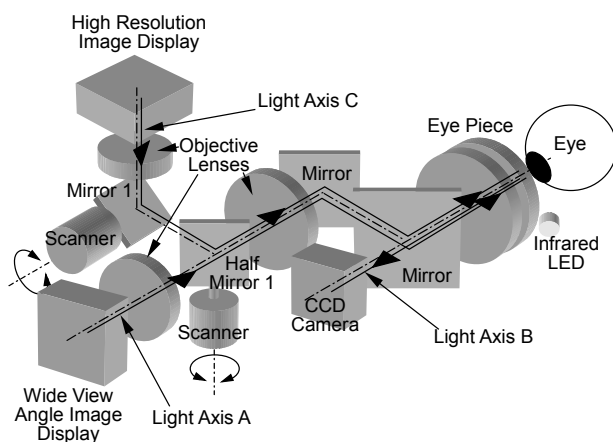


Fig.5.3 Structure of image display system for right eye

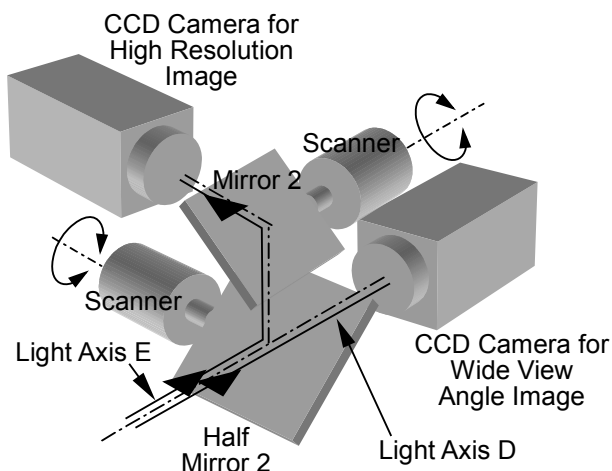
### 5.2.1.2 映像提示システム

上記の検討結果に基づき、試作した映像提示システム(右眼用)の構成を Fig.5.3 に示す。図でスキャナは高解像度映像の提示位置を制御するためのものである。広視野映像は、光軸 A の経路を通りオペレータに提示されている。オペレータの目の映像は光軸 B の経路を CCD カメラによって取得され、視線検出に利用される。高解像度映像はおよそ光軸 C の経路を通りオペレータに提示されている。視線検出の結果によって、ミラー1、ハーフミラー1の角度が制御されて高解像度映像の提示位置がオペレータの視線方向に一致する。システムはテーブル上に配置されており、オペレータはあご台によって顔を固定する。

### 5.2.1.3 撮像システム

このような提示装置に対して提供できる映像としては、コンピュータグラフィックス映像(CG)や、カメラによって取得される実環境映像がある。前者は、視線方向に応じた高解像度映像や広視野映像をリアルタイムで作成することによって実現できる。一方、後者は視線追従型映像提示システムに対応した撮像システムが必要であり、その実現には上述の映像提示システムに対応して広視野の映像と、オペレータの視線方向の高解像度映像を取得できる機能を備える必要がある。

上述の映像提示システムに対して実環境映像を提供する撮像システムを実現するには少なくとも、広視野映像を取得するカメラ、高解像度映像を取得するカメラ、取得する高解像度映像の方向を制御する機構、両映像の画角を調節する機構が必要である。取得する高解像度映像の方向を制御する機構については、映像提示システムと同じ理由から軸別制御方式が有利である。また画角の調整については、複数の対物レンズを使用する方法も考えられるが画角の調節のためにレンズを交換したり、配置を変更したりする必要があるため、調節の容易さから、ズーム機能付きの CCD カメラが優れる。このような検討に基づき、実環境の映像を取得するために試作した撮像システム(右眼用)を Fig.5.4 に示す。それぞれ光軸 D、光軸 E を通り、広視野、高解像度映像が取得される。ミラー2、ハーフミラー



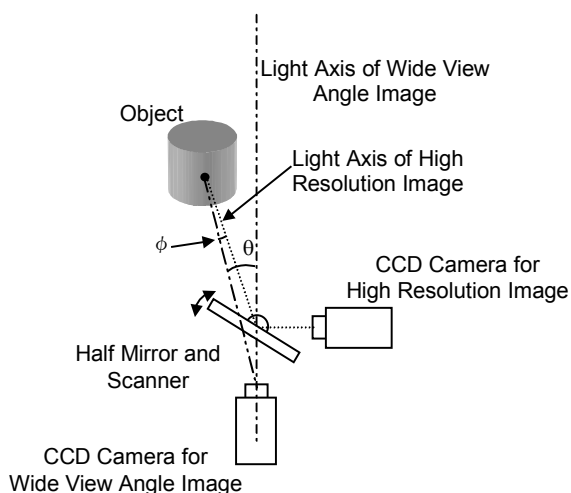
**Fig.5.4** Structure of image capture system for right eye

2 の角度は、映像提示システムの視線検出結果をもとに、オペレータの視線方向の高解像度映像が取得されるように制御される。

### 5.2.2 軸別制御方式の特性

CCD カメラの前方にミラーを配置しその角度によって、撮像方向を制御するこの軸別制御方式では構造上、次のような特性がある。

まず、Fig.5.5 に示すように、ミラー1枚で撮像方向を水平方向に制御する構成で考える。このとき、広視野映像用 CCD カメラの光軸に対して、



**Fig.5.5** Angles Relations of captured images

$\theta$  の角度にある物体を見る場合、高解像度映像用 CCD カメラと広視野映像用 CCD カメラとでは角度  $\phi$  だけその物体を見る角度が異なることになる。これは広視野映像用 CCD カメラの光軸と高解像度映像用 CCD カメラの光軸が一致している場合は、 $\phi=0$  となるが、 $\theta$  が大きくなるにつれて  $\phi$  も大きくなる。また、ミラーと両 CCD カメラとの距離が大きいほど、 $\phi$  も大きくなる傾向がある。(詳細は付録 C 参照) すなわちミラーの回転によって高解像度映像の光軸が、広視野映像の光軸から外れるにしたがって、同一物体に対して撮像される広視野と高解像度映像の角度差が大きくなるため、撮像された高解像度映像が提示システムにおいて広視野映像にスーパーインポーズして提示される場合、映像内容が少し異なるので、境界で両映像がうまく接合しないことになる。同様に Fig.5.4 のような 2 次元の構成で考えれば、水平方向だけでなく、垂直方向にもこの角度差が生じる。この構成の場合、垂直方向制御用のハーフミラーと高解像度映像用 CCD カメラ間の距離は、水平方向制御用ミラーと高解像度映像用 CCD カメラ間の距離よりも長い場合、ハーフミラーを回転させたときの垂直方向の角度差は水平方向のそれよりも大きくなる。そこで実際にシステムを構成する際には、この角度差を小さくするための設計指針としては以下の点に留意する必要がある。

- ・ミラーと広視野・高解像度映像用各 CCD カメラと距離をできるだけ小さくする。
- ・作業内容にあわせて、最も使用頻度の高い領域、空間領域に、高解像度および広視野映像用 CCD カメラの光軸を合わせるように設計する。
- ・通常、眼球の動きは垂直方向よりも、水平方向の方が大きいので、撮像システムでは、Fig.5.6 のように垂直方向制御用ミラーよりも水平方向制御用ミラーの方を高解像度映像用 CCD カメラに近くなるように設計する。

### 5.2.3 視線検出の原理

視線検出は Fig.5.7 に示すように、あらかじめ瞳孔形状の 1 部をテンプレートとして複数記憶しておき、入力された眼の映像に対してテンプレートマッチングによりその瞳孔中心位置を算出する手法を用いている。視線検出のコントロ

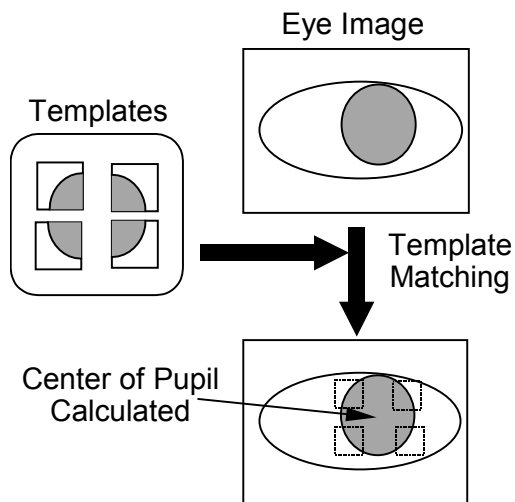


Fig.5.7 Principle of eye movement detection

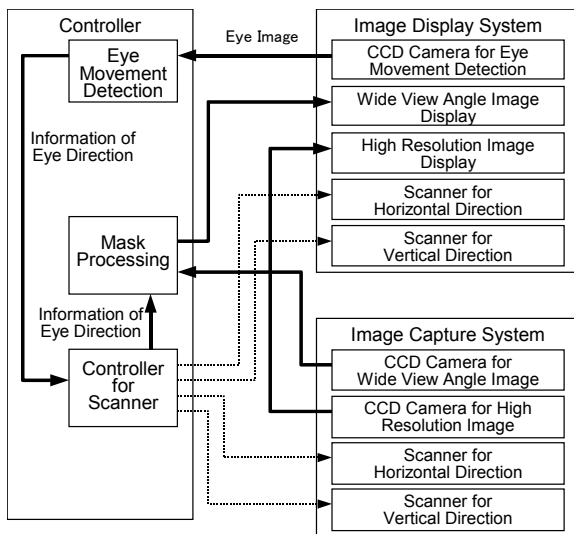


Fig.5.8 Structure of controlling system

ーラは Pentium200MHz の CPU を持つ PC を，画像入力ボードは，Matrox 社の Meteor を使用した．視線検出のサイクルタイムは約 66～100mS である．

#### 5.2.4 制御システムの構成

制御システムの構成を Fig.5.8 に示す．このシステムでは，映像提示システムと撮像システムがコントローラに接続されている．コントローラ

ラとして，視線検出，マスク処理，スキャナ制御それぞれに PC を 1 台ずつ使用し，独立した処理が行われている．まず，提示システムの視線検出用 CCD カメラにより取得されたオペレータの眼の映像がコントローラで画像処理され，視線方向が算出される．その視線方向の情報をもとに，撮像・提示システムのガルバノメータスキャナの角度が制御される．その結果オペレータの視線方向に一致した高解像度映像が撮像・提示される．撮像システムで得られた高解像度映像は直接，高解像度映像用ディスプレイに送られる．一方取得された広視野映像は，高解像度映像が重なる領域がマスク処理され，広視野映像用ディスプレイに送られる．この処理は広視野映像と高解像度映像が重なって提示されることによる映像の劣化を防ぐためのものである．試作したシステムの外観を Fig.5.9, Fig.5.10 に示す．

#### 5.2.5 試作システムの仕様

ガルバノメータスキャナはすべてジェネラルスキャンニング社製 MG330 を使用した．提示システムのディスプレイは，EVF-UNIT（三菱電機社製）で解像度 768×492，撮像システムの CCD



Fig.5.9 Image display system



Fig.5.10 Image capture system

カメラは EVI-310（ソニー社製）で、有効画素数  $768 \times 494$  である。また広視野映像は対角で約 44 度、高解像度映像は対角で約 8 度の画角で映像提示できる。この試作システムでは光学デバイスの制限から、視線追従型映像提示装置の概念を実現するには視野角や解像度が十分とはいえないが、本論文の目的である視線追従によって高解像度映像が適切に提示されるかどうかを確認することは十分に可能である。

### 5.3 高解像度映像の提示条件と評価実験

#### 5.3.1 高解像度映像の提示条件

本システムにおける高解像度映像の提示は、撮像システムの高解像度映像の取得位置および映像提示システムの高解像度映像の提示位置を、オペレータの視線方向に一致するように、同時に制御することによって行われる。このようなシステムにおいて、高解像度映像提示の条件としては広視野映像上のオペレータの注視点と、高解像度映像の提示位置が一致し、かつ高解像度映像の内容が実環境におけるオペレータの視線方向と一致する必要がある。そのためには少なくとも、1)視線検出が精度良く行われていること、2)映像提示システムにおいてスキャナのミラー角度の制御が精度良く行われていること、3)映像提示システムにおいて広視野映像とそれにスーパーインポーズされている高解像度映像との間にずれがないこと、4)撮像システムによって

取得される高解像度映像の方向と映像提示システムで提示される高解像度映像の角度関係が同じであること、などの条件が広視野映像の全域に渡って成立している必要がある。これらの条件が満たされない場合は、広視野映像上で確認した位置に視線を動かしても、高解像度映像が本来その位置に提示されるべき映像ではなかったり、注視点に高解像度が提示されない等の問題が生じることになり、等価的な広視野高解像度提示を実現することができない。本論文では、高解像度映像提示の条件である①広視野映像上のオペレータの注視点と、高解像度映像の提示位置が一致しているか、②高解像度映像の内容が実環境における視線方向のものと一致しているかについての評価、および条件③高解像度映像がオペレータの視線移動に対して高速に追従しているかどうかの評価を行う。

#### 5.3.2 実験方法

撮像システム前方 1m の位置に Fig.5.11 に示すような 9 個の指標を配置する。これらの指標は 15cm 間隔で格子状に配置され、視力検査で用いるランドルト環と次に見るべき指標の方向を示す矢印から構成されている。被験者はまず中央の指標を見る。そしてそのランドルト環の切り欠きの方向を回答し、矢印の指示に従って、次に見るべき指標へと視線を移動する。この手順を繰り返し 9 個のランドルト環の切り欠きの方

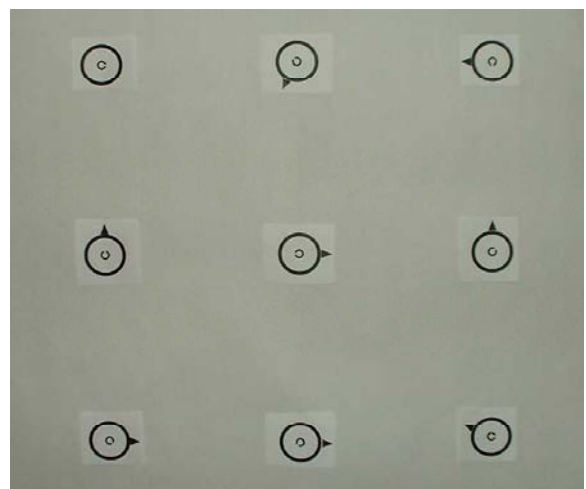


Fig.5.11 Example of experimental environment

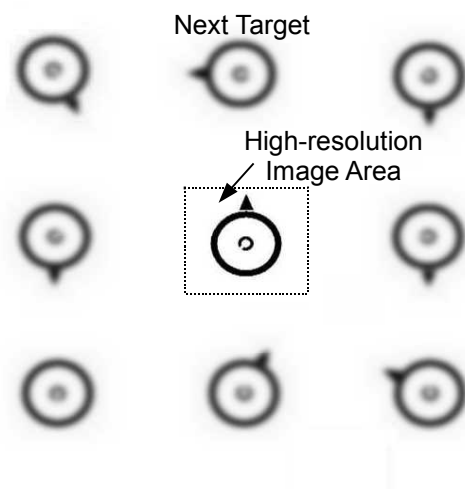


Fig.5.12 First step of the experimental sequence

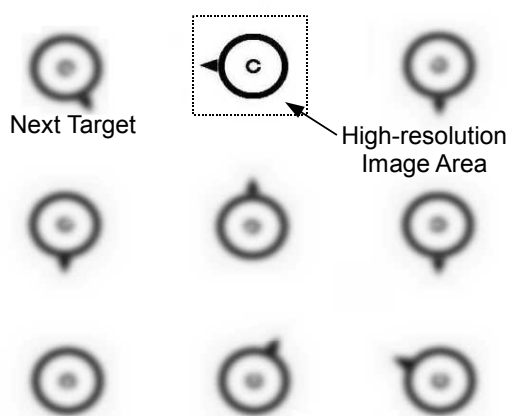


Fig.5.13 Second step of the experimental sequence

向を順次回答する。システムを用いてこの実験を行うと、被験者が中心の指標を注視したとき、Fig.5.12 に示すように注視点周りの中心部だけが高解像度で提示される。中心部のランドルト環の切り欠きの方向を回答後、矢印の指示に従って視線を上方向に移動する。その際、被験者は視線を移動する前に広視野映像上の次に注視すべき指標のおよその位置を周辺視によって確認できる。システムは、常に被験者の視線検出を行い、高解像度映像位置を注視点に一致するように制御しているから、視線を移動すると注視

している上中央の指標だけが Fig.5.13 の様に高解像度で提示される。指標として用いたランドルト環は広視野映像の低解像度では認識できないが、高解像度映像では容易に確認できるもので、視力 0.2 相当のものを選んだ。従って注視点位置に適切に高解像度映像が提示されなければ、ランドルト環の切り欠きの方向を回答することはできない。なお 15cm 間隔で 9 個の指標の配置については、現状の光学系で視力 0.2 相当のランドルト環を十分に提示できる最大の範囲に設定した。

本実験では被験者が Fig.5.14 に示すジョイスティックレバーを倒す方向によってランドルト環の切り欠きの方向を回答するように指示した。このとき、初めにレバーを倒したときから最後のランドルト環の切り欠きの方向を回答した時点までを作業時間とし、レバーを倒した方向と共にコンピュータによって計測・記録される。実験指標は 16 パターン用意し、それらはランダムに用いられるので、被験者が実験でどのパターンが用いられるのかを事前には知ることができない。被験者は、事前に予備実験でシステムを使用して指標をはっきりと見える視力を有することを確認し、かつ上記の実験条件の下で十分に訓練した 2 名の被験者を用いた。今回の実験では、試作システムの右眼のシステムのみを使用した。

また、本システムが高速に高解像度映像提示を行っているか評価するため、比較として試作システムを用いて映像提示する代わりに、①直



Fig.5.14 Joy stick box



接視によって指標を見る実験と、②高解像度映像のみを市販の NTSC ディスプレイで提示し、その指標を見る実験を行った。市販のディスプレイを用いる実験では、高解像度映像の取得位置の制御はジョイスティック横のボタンを押しながらレバーを操作することで行う。レバーを倒している間移動し、レバーを戻すと高解像度映像はその位置で停止する。ボタンを離してレバーだけを倒すと指標の切り欠きの方向を解答できる。今回、高解像度映像位置は、撮像システムのミラー角度をジョイスティックで制御することにより行ったが、ミラーは非常に高速に動作するため通常の方法での操作は難しい。そのため高解像度映像の移動速度は複数の被験者で予備実験を行い、操作可能でかつ最も高速であると判断された速度に設定した。その結果、Fig.5.11 の左右両端の指標の間を約 0.49 秒で移動できる。

NTSC ディスプレイを用いて一般的な遠隔操作の用途に用いる場合、主な手法としては以下の2つが考えられる。

- a) 2組のカメラとディスプレイを用いて高解像度用の映像と広視野の映像を別のディスプレイで表示できるようにしておき、その2つのディスプレイを見ながら高解像度用の映像位置をジョイスティックなどを用いて制御する方法。
- b) 1組のカメラとディスプレイを用いて、ズームや方向をジョイスティックなどを用いて制御する方法

しかし、通常の方法の用途では、まず a) の方法では2つのディスプレイを交互に見なければならず、それに加えて広視野映像上の高解像度映像の位置が把握しにくいこと、また、b) の場合にはカメラの性能にも依存するが、ズーム機能を用いている時間がそのままロス時間となるなど、作業時間が視線追従型映像提示システムよりも長くなると予想される。そこで、本実験では NTSC ディスプレイがより有利になると思われる実験課題を設定した上で比較対象とした。

すなわち、b)の方法を採用し、かつ実験課題を高解像度映像の内容だけで次に見るべき方向がわかるようにしてズームを用いる時間を無くし、かつ指標を格子状に配置させ、次の指標のおよその位置も推測できるように設定したことで、

作業時間を短縮できるようにした。

### 5.3.3 実験結果

試作システムを用いた実験の結果、2名の被験者とも正しくランドルト環の切り欠きの方向を回答することができた。このことから被験者の視線方向を検出し、その注視点位置に高解像度映像が適切に提示されていることを確認した。すなわち、検討した光学システムを用いることによって、前述の高解像度映像提示の条件である①広視野映像上のオペレータの注視点と、高解像度映像の提示位置が一致し、かつ②高解像度映像の内容が実環境における視線方向のものと一致していることを確認した。

次に評価すべき高解像度映像提示の条件である③高解像度映像がオペレータの視線移動に対

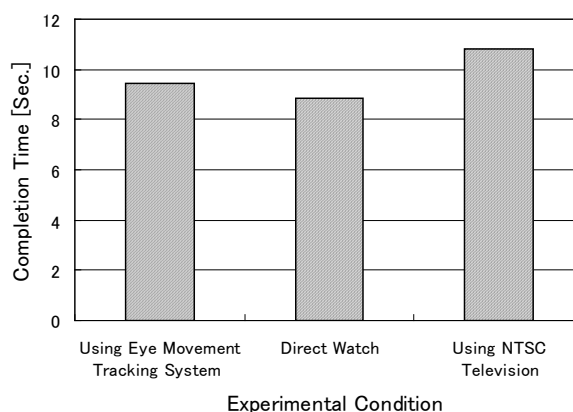


Fig 5.15 Experimental result (Subject T.T)

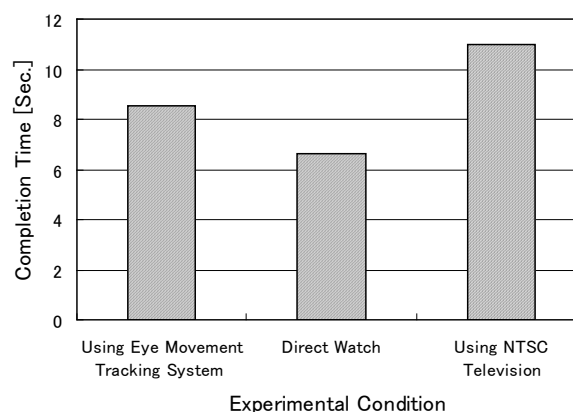


Fig 5.16 Experimental result (Subject K.I)

して高速に追従するかどうかについて実験で計測された作業時間を Fig.5.15, 5.16 に示す。グラフ左から試作システムを使用した場合、直接視の場合、市販のディスプレイに高解像度映像のみを提示した場合について、それぞれ 3 回の試行における作業時間の平均値を示している。なお本実験では被験者数 2 名、試行回数 3 回としたが、システムの動作の中で個人差の大きい視線検出における瞳孔抽出について、すでに多くの報告がされており、多くの被験者で検出可能なことは明らかになっているため、本論文の目的である、「高解像度映像提示の条件①②③を提案する手法で満たし得るか」を評価する実験としては十分な数と考える。試作システムを用いた場合の作業時間は、直接視の作業時間に及ばないが、高解像度映像のみを NTSC ディスプレイに提示してジョイスティックで操作する場合よりも短時間になることがわかった。試作システムの作業時間が、NTSC ディスプレイに提示する場合よりも短いのは、広視野映像情報を活用して、周辺視で次の指標の位置を確認できることや高解像度映像提示位置を視線で制御できることが主な原因だと思われる。仮に、この実験で指標パターンが実際の制御盤のように完全な格子状に並んでいないとすると、両者の作業時間差がより大きくなることは容易に想像できる。また、この作業時間は、レバーを 1 回目に倒したときから 9 回目を倒すまでが計測されているので「視線移動」、「指標認識」、「レバーを倒す」という動作 8 サイクル分の時間を示していることになる。1 サイクルあたりの作業時間はシステムを使用した場合は平均約 1.12 秒、直接視の場合は平均約 0.97 秒で、その差は約 0.15 秒である。この作業時間を直接視に近づけるためには、少なくともシステムの高解像度映像の移動時間が、人間の視線移動開始から認識が行われるまでの時間よりも高速でなければならない。通常、人間の眼球の高速運動（サッケード）終了後、注視点の内容を認識するまでに 200~400ms 必要といわれていることから、本システムが直接視と同等の映像提示を行うには、少なくとも注視点が移動したとき高解像度映像が常に 200ms 以内で追従することが必要である。現状のシステムの視線検出のサイクルは 66~100ms、スキャナミラーの動作時間は、例えば今回実験で使用し

た指標の両端に相当する視野角約 15 度分の移動に対して 80ms 以内である。現状のシステムでは、視線検出とミラーの制御は別の PC で独立して行っている。そのためタイミングによっては、サッケード終了後高解像度映像が追従して提示されるまでに 200ms 以上かかる場合も考えられる。より高速化するためには視線検出処理を高速にする、ミラーを薄く小さいものに変更するなどにより高速動作させる、カメラ側とディスプレイ側のスキャナミラーの過渡状態における挙動特性を同じにすることで過渡状態での高解像度映像内容の揺れを止めるなどの改善を行うことによって直接視により近い映像提示が可能になると思われる。

また、代表的な遠隔操作として映像を見ながらマニピュレータを操作するような用途で視線追従型映像提示システムと NTSC ディスプレイによる提示を比較すると、NTSC ディスプレイによる提示では、ジョイスティック操作等によるカメラの方向制御や、ズーム機能などを用いながら視覚提示を行い、かつ同時にマニピュレータなどを操作することになる。すなわち人間の手によって視覚系とマニピュレータなどを両方操作しなければならない。一方、視線追従型映像提示システムでは、人間の手で視覚提示デバイスを操作する必要がなく、より効率的であるといえる。そのため実際にロボットの遠隔操作を行う場合においても、本実験結果のように作業時間に差が出ると推測される。

## 5.4 結言

本章では、視線追従型映像撮像・提示システムを具体化するための映像提示システムと、実環境映像を取得するための撮像システムの構成方法について検討を行い、高解像度映像提示位置を 2 次元に制御できる試作システムを構成した。次に高解像度映像を視線に追従して適切に提示するための条件について検討し、格子状に並んだ 9 個の指標を用いて高解像度映像提示の評価実験を行った。実験の結果、オペレータの注視点と高解像度映像の提示位置が一致して、その視線方向に一致した映像内容が高解像度映像として提示されていることを確認し、検討・

試作した撮像・提示システムの有効性を確認した。また、オペレータの視線移動に対する高解像度映像の追従性能について、実験中の作業時間を計測した結果、現状のシステムでは、直接視には及ばないが、市販の NTSC ディスプレイを視覚提示に用いた場合よりも作業時間が短くなることがわかった。

今後、実用化していくためには、遠隔操作において直接視とほぼ同等の効率を得るべく、高解像度映像の制御や視線検出手法など各要素を

検討し改善を行っていく必要がある。また、システムの小型化によりヘッドマウントディスプレイとして開発し、頭部の動きの自由度が許容できるようになれば視覚提示装置として有効な手段になると思われる。またこのシステムでは、操作者の注視点に常に焦点のあった映像を提示でき、全領域が高解像度映像ではないため、伝送データ量が少なくロボットの遠隔操作等の映像提示に適すると考えられる。

## 第6章 視線追従型映像提示システムの設計指針

### 6.1 緒言

本章では、2章から5章で行った人間の視覚特性に関する評価実験や、試作システムを用いた評価実験結果をもとに得られた知見から、視線追従型映像提示システムを構成するための設計指針について述べる。具体的には、NTSC ディスプレイや HDTV のデバイスの使用を想定し、境界を認識できない広視野映像と高解像度映像の視野角と解像度としてどのような値を選ぶべきか、その際の伝送容量はどの程度まで少なくなるのか検討する。また高解像度映像を視線追従させる時、その提示時間遅れはどの程度まで許容されるのか検討する。さらに、広視野と高解像度映像の境界について動的に変化する際にもそれが認識できないようにするための高解像度映像の制御方法について考察し、この制御法の適用できる範囲を明らかにする。そして、映像提示システムを構築した際の高解像度映像提示時間遅れをより短くしたり、高解像度映像移動のための制御手法について述べる。

### 6.2 画角と解像度

2章で得られた評価実験結果から、NTSC 方式（ここでは走査線数  $525 \times 525$  と仮定する）のディスプレイの使用を想定し、視線追従型提示系の高解像度、低解像度ディスプレイの視野角について考察する。まず各視野角は Fig. 2.11~2.14 より以下の手順で求められる。今、NTSC 方式ディスプレイの走査線数を  $N$  本、人の視力を損なわない映像提示を可能にするディスプレイ分解能を  $f_x$  cpd とすると、最大高解像度視野角  $\theta_{mx}$  は、定義より次式となる。

$$\theta_{mx} = 0.5 N / f_x \quad (6.1)$$

一方 Fig. 2.11~2.14 から、この  $\theta_{mx}$  に対応する2つの領域の境界の判別が困難になる中心・周辺領域の分解能の比 ( $S_c / S_p$ ) が求まる。この比の  $S_c$  は中心領域の分解能  $f_x$  より(2.2)式を計算して求めることができるから、上記の比の逆数にこの  $S_c$  を乗じ

て、高解像視野角  $\theta_{mx}$ 、分解能  $f_x$  cpd の中心部提示画像との境界が識別できなくなる周辺部領域の  $S_p$  が決定される。ここで(2.2)式よりそれに対応する分解能  $f_p$  cpd を算出すれば、これより低解像領域の視野角は、分解能  $f_p$  cpd を持つ画像を NTSC ディスプレイを用いて実現するときの視野角  $\theta_x$  として、次式で与えられる。

$$\theta_x = 0.5 N / f_p \quad (6.2)$$

以上の計算をより容易に実行することを可能にするために、 $\theta_{mx}$  と  $\theta_x$  の関係を直接表示したグラフを Fig. 6.1 に示す。なお、この関係は Fig. 2.11~2.14 のそれぞれについて導出できるが、ここでは被験者全員が境界の識別ができなくなる  $\theta_{mx}$ 、 $\theta_x$  を与えるデータとして、最も大きな高解像度視野角を示す Fig. 2.11 に注目し作製した。また、図中の点線は(6.1)式の関係併せて表示したものである。

この図から例えば換算視力 1.0 (30cpd)を実現することを想定する場合、まず点線の関係から高解像度視野角が約9度必要なが分かる。またさらに実線の関係から、およそ背景の低解像度領域の視野角は110度程度にできることが分かる。言い替えば、換算視力 1.0 を実現する視線追従型映像提示システムでは、NTSC 方式ディスプレイを用いる場合、高解像度映像提示ディスプレイに視野角9度、それが

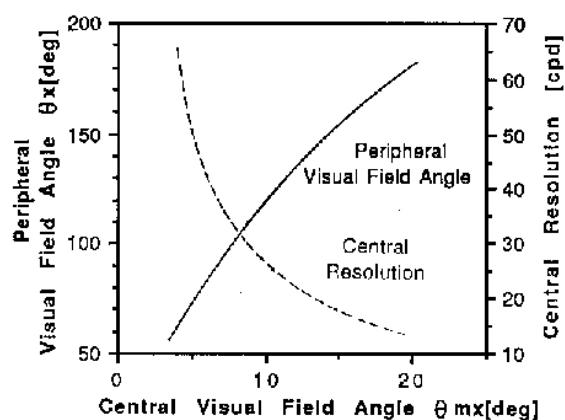


Fig. 6.1 The relation between central visual field angle and peripheral visual field angle, and central resolution using NTSC displays

提示する像との解像度の差を分からなくする低解像度映像の提示用ディスプレイには最大で視野角 110 度のものを用いればよいことが分かる。低解像度提示系の視野角 110 度は人の全視野をほぼカバーしており、視線追従型映像提示システムが解像度、視野角の両面で十分な仕様をもつ提示系を構築する可能性を有することがこの結果から判明する。なお、110 度の視野角を HDTV 一つで実現する場合の換算視力は約 0.3(4.55cpd)であり、NTSC 方式ディスプレイを用いる視線追従型映像提示システムはハイビジョンを越える分解能を持つ提示系をも提供することが分かる。このような換算視力 1.0 のディスプレイが構成されれば、換算視力 1.0 は視野角 1 分の分解能に相当するので、30cm 離れて 0.087mm 幅の分解能、50cm の距離では 0.145mm 幅の分解能を有することになり、遠隔操作の視覚検査に用いることを想定すれば、0.1mm 程度の幅の亀裂を見つけたり、アナログメータ（テスターなど）を読み取る作業にも対応できることになる。以上のごとく、Fig. 6.1 の結果は視線追従型映像提示システムの一つの設計指針を与えるが、実際の提示システムの設計に当たっては、背景の低解像度領域の視野角の技術的制限、眼球位置の測定誤差、高解像度画像出力のタイムラグなどを考慮にいれ、さらに最適化を図る必要がある。

同様にしてより解像度の高い HDTV デバイスを用いた場合を考える。ここでは走査線数  $1125 \times 1125$  として換算視力 1.0 を実現する映像提示を行うとすると、換算視力 1.0 (30cpd)を実現する高解像度視野角は式 6.1 から  $N=1125, f_s=30$  として約 19 度となる。これに対応する広視野映像領域の大きさは、Fig. 2.11 から  $S_c/S_p = 1.434$  で  $S_p = 0.697$  で  $f_p = 1.49\text{cpd}$  となるが、広視野角は人の全視野をほぼカバーできる 110 度(5.11cpd)以上にする必要はなく、その場合高解像度映像 30cpd、広視野映像 5.11cpd の時の高解像度映像視野角は、Fig. 2.11 から 5 度以下であり、境界が認識できる大きさに比べて少なくとも上下左右 7 度以上の余裕がある。このことは換算視力 1.0 相当の解像度を保ちつつも、視線検出の精度、高解像度映像提示の時間遅れに余裕ができることを示している。滑動性眼球運動時でも境界が認識できない。または視線移動が 7 度以内なら、高解像度映像を移動させないなどの制御ができるなど多くの利点が考えられる。

### 6.3 伝送容量について

広視野高解像度の映像提示では、遠隔で映像提示を行う場合に伝送容量が大きくなる問題がある。視線追従型映像提示方式では、映像領域全体が均一の解像度で同等の視野角、解像度を有する映像と比べて、伝送容量を抑えられる利点がある。例えば、NTSC ディスプレイで換算視力 1.0 の映像提示を行うには、前述のように高解像度視野角 9 度、広視野角 110 度となる。これと同じ解像度と視野角を NTSC ディスプレイを並べて実現するためには、視野角 9 度の大きさのディスプレイを約 144 画面分並べる必要がある。これは、ディスプレイ 2 画面分を使用する視線追従型映像提示方式と比べれば、伝送容量は 72 倍となる。

またデジタル映像の場合を考えると、全体が均一の解像度の映像ではなく、注視点付近に比べて周辺の映像の圧縮率を上げることによって視線追従型映像提示を行い、映像全体の伝送容量を減らすという方法が考えられる。また伝送容量が同じという条件で考えればこの方法では、全領域で均一な解像度の映像に比べて、より広視野高解像度映像の提示が可能であり、また同じ視野角の映像の場合では、伝送容量が同じでも注視点付近はより解像度の高い映像を提示できることになる。

### 6.4 高解像度映像の視線追従

3 章で得られた評価実験結果から、サッカー抑制を考慮した高解像度映像の視線追従について考察する。ここでは、提示遅れ時間が最も短い被験者 H.H の実験結果を用いて考えると、例えば前節で検討を行った NTSC ディスプレイで視力 1.0 相当の解像度で、かつ境界が認識できない高解像度映像の幅 9 度、広視野映像の幅 110 度の場合、走査線数を 525 本として高解像度領域の解像度は  $R_h = 29.16\text{cpd}$ 、周辺領域の解像度は  $R_l = 2.39\text{cpd}$  であるから、フェヒナーの法則を用いた式(3.2)から  $S_h/S_l = 2.01$  となる。この値に対する許容できる提示時間遅れは、被験者 H.H の評価実験結果である Fig. 6.2 のグラフから約 60ms 程度であることがわかる。遠隔操作のシステム構成の場合、1 章の概念図で示した提示システムとそれに対応した、広視野映像用カメラとオペレ

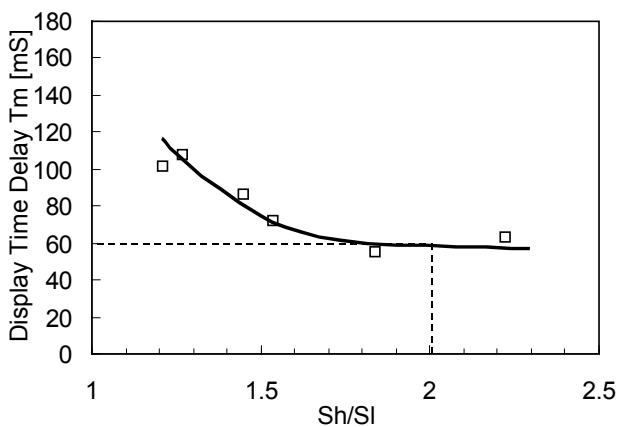


Fig. 6.2 The relation between  $Sh/SI$  and  $T_m$  (subject H.H, eyesight 2.0)

一タの視線方向に一致するように制御された高解像度映像用カメラから構成される撮像システムからなるとすると、動作としては視線検出で視線の移動・停止を検出し、視線方向をカメラ側に送信して、高解像度映像用カメラ位置と高解像度映像提示位置を視線方向に一致するように変更する。それと同時にカメラで取得された映像を受信し、映像提示することになる。実験結果から、サッカード終了後 60mS 以内に高解像度映像を視線追従させるとすると、NTSC 方式のディスプレイを用いる場合、通常 33mS で画像が更新されるからそれ以外の動作を、27mS 以内に終了させればよいことになる。

一方、もう一つの視線移動である滑動性眼球運動（スムーズパースト）については、滑動性眼球運動中でも注視時と同等の視力を維持できるとすると、高解像度映像と周囲の低解像度映像との境界を認識できるかどうかは、人間の網膜の構造上、両解像度と、高解像度映像の大きさによって決まるから、境界を認識できないようにするには、視線追従している小領域高解像度映像の大きさを、広視野と高解像度の境界を認識できない最小の領域よりも、少し大きめにすることで解決できる。例えば、スムーズパーストの限界速度 30 度/秒で視線移動し、かつその軌道に対してシステムが 60mS 遅れで高解像度映像をスムーズに追従できるとすると、視線は 60mS の間に 1.8 度動くから、解像度は低下するが高解像度の領域の大きさを 1.8 度大きくしておけば、広視野と高解像度の境界を認識できない。ただし、この

滑動性眼球運動は、移動する対象を見る場合にしか発生しないので、遠隔視覚検査、絵画の鑑賞など対象が静止しているアプリケーションでは通常考慮する必要がない。しかし、適用するアプリケーションによって、滑動性眼球運動を考慮する必要がある場合には、滑動性眼球運動中に境界が認識できても解像度を優先するか、境界が認識できないことを優先するならば、解像度を犠牲にして高解像度領域を少し大きくするか、あるいは視線の移動速度によって高解像度映像領域の大きさを可変にするなどの方式から選択する必要がある。

## 6.5 周辺視と境界の認識

人間の視覚特性として周辺領域では高解像度の像を受容できないが、物体が移動したり、ランプが点灯するなどの変化に対しては敏感に感じる能力がある。そこで視線追従型映像提示システムとして動的に映像提示を行うことを想定して、2 章の実験で行ったような静止画像では広視野と高解像度の境界を認識できない条件下で、視線の移動に伴って境界が動く場合に、周辺視の変化知覚が働き、境界が認識できるかどうかを確認する必要がある。

そこで、被験者 2 名を用いて以下のような予備実験を行った。3 章で用いた注視点付近が高解像度でその周囲が低解像度の縞模様を提示する。3 章で用いた実験装置、縞模様を用い Table 3.1 の解像度条件 2（高解像度領域 6.86cpd, 低解像度領域 1.37cpd）とし注視状態で境界が認識できない大きさに調整後、以下の実験を行った。

まず注視時の境界認識評価を行った。高解像度領域を画面中心に配置し、高解像度領域の中心に提示された指標を注視した状態のまま境界を動かすと静止時には認識できない程の高解像度視野角でも、その境界を認識できることを確認した。縞模様では境界が動くと、局部的に白や黒からグレーに、あるいはその逆に輝度が変化するために、その違いを認識できるものと考えられる。これは、提示映像が縞模様に限らず輝度や色彩が変化する場合、同様に境界が認識できると思われる。視線追従型映像提示システムにおいては、注視状態では固視微動を検出しないようにして視線検出結果も一定値とし、境界は動かないようにする必要がある。ただし、高解像度映像領域の周辺で境界をまたぐように物体が常に移動し

ているような状況下では、境界が認識できる可能性がある。

次に滑動性眼球運動（スムーズパースト）の際の境界認識評価を行った。高解像度映像領域の中心に十字の指標を配置し、静止画像を注視している状態では高解像度と広視野の境界を認識できない高解像度視野角を維持しつつ、指標のみを一定速度（約3度/秒）で移動させ、それをあご台により頭部を固定した被験者が目で追う実験を行った。その結果、高解像度と広視野の境界は認識できないことを確認した。この実験の指標のように移動する対象が小さな場合には、他の静止している対象は流れた像となり、それが高解像度映像領域内であっても、高解像度で見ることが困難になる。このことが結果的に境界を認識できなくさせると推測される。また、この滑動性眼球運動に関して高解像度映像領域よりも大きな物体が移動した場合を想定して、十字の指標を動かす際に、高解像度映像領域とその周辺の低解像度領域の縞模様も一緒に動かし、同様に指標を目で追う実験を行った結果、両映像の境界の認識は、注視時と同様、注視時に境界が認識できない高解像度視野角では、滑動性眼球運動中にもそれを認識できず、注視時に境界が認識できる高解像度視野角では、滑動性眼球運動中にも境界は認識できた。すなわち、静止画像を注視しているのと同じ高解像度領域の大きさを確保する必要がある。これらの結果から、滑動性眼球運動に関して視線追従型映像提示システムにおいては、高解像度映像領域よりも小さな物体が移動し、それを滑動性眼球運動で追う必要がある場合には、前節で述べたように滑動性眼球運動時に高解像度映像追従が遅れて、注視点と高解像度映像の中心が最大で1.8度ずれたとしても境界は認識できないと思われる。そして高解像度映像領域よりも大きな物体が視線の移動速度にして30度/秒以下の低速で移動してそれを滑動性眼球運動によって目で追う必要があり、かつその際に境界が認識できることが問題となるアプリケーションに関しては、前節で述べたように高解像度映像領域を広げる必要がある。ただし、4.5章で試作したシステムのように視線検出と高解像度映像領域の移動を繰り返すために、視線移動する軌道に対して高解像度映像の追従が断続的に行われる場合には、高解像度映像領域よりも大きな移動物体であって、かつそれが縞模様のように輝度や色の変化が激しいものであると、注視時に境界が動くのと同じ状況となり、境界が認識できると

推測できる。

またサッカーの発生時は、3章の実験結果から、サッカー開始から終了後60mS以内までは注視点近傍でさえも、低解像度から高解像度に変化しているのが知覚できないことから、この時間帯では境界は動いていても認識できない。そのためサッカーに対しては、60mS以内に高解像度映像が追従できれば、考慮する必要はないと考えられる。

## 6.6 視線検出のタイミング

5章で試作したシステムにおいては、視線検出と高解像度映像の移動・提示を常に交互に行っていた。この視線検出と高解像度映像の移動・提示に必要な時間が、前節で議論した許容される提示時間遅れよりも短い場合でも、提示映像が常に高解像度であるかのように感じられないことがある。それはサッカー発生中に視線検出が行われる場合である。このとき高解像度映像が視線移動中の位置に一度移動することになり、高解像度映像の提示が、許容できる時間遅れよりも遅れる場合がありうる。高解像度映像の移動は、できるだけ少ないほうがよく、注視点から次の注視点に移動することが望ましい。人間の眼球運動の特性を考慮して制御することにより、高解像度映像の移動回数を少なくし、視線追従の提示遅れ時間をより短くできる。

視線移動に関する眼球運動には、滑動性眼球運動（スムーズパースト）と断続性眼球運動（サッカー）があるが[29-33]、滑動性眼球運動（スムーズパースト）は、運動物体を視線が追うときのスムーズで低速の眼球運動で、対象が静止している場合には、意識的にこの運動を行おうとしてもできないことから、ここではまず多くのアプリケーションにおいて作業時間の大部分は注視とサッカーの繰り返しであると仮定して視線検出のタイミングを考える。前述のようにサッカーは、0.2秒より短い間隔では発生しないから、サッカー終了後0.2秒の間は、視線検出や高解像度映像の移動は行う必要はなく、映像提示だけを行えばよい。次にサッカーが始まれば、サッカー終了した時点で視線検出し、注視点を検出、高解像度映像を移動させることが望ましい。そのためには、サッカーが終了するまでは視線検出を連続して行い、サッカー終了と判断された時点で、その算出された注視点に高解像度映像を移動させればよい。

また、この制御方法では視線移動が始まれば視線検出を連続で行うため視線移動速度が算出できる。そこで滑動性眼球運動(スームースペースト)に対応するには、もし視線検出によって算出された視線の移動速度が、滑動性眼球運動の限界速度 30 度/秒以下ならば、滑動性眼球運動であると判断し直ちに高解像度映像を視線追従させる必要があり、その際の高解像度映像は、視線移動速度に同期して、一定速度で移動することが望ましい。

## 6.7 高解像度映像の移動と提示方法

高解像度映像の移動中には、広視野映像との境界での不整合を完全になくすことは困難である。それは、NTSC 方式などの映像デバイスでは 1 画面分の描画に一定の時間を必要とすることや、スキャナーによる高解像度映像の制御位置と映像内容が不一致となるためである。多くの視覚検査などではこの過渡的な現象は短時間であるために作業効率には影響はないと思われるが、アプリケーションによっては必要ならばこの問題を考慮する必要がある。

これを実現するには、いくつかの手段が考えられるが、そのうちのひとつとして、4 章で紹介したシャッター方式が考えられる。この方式は、高解像度映像の光軸上にシャッターを設けて、1/30 秒の周期で開閉させる。高解像度映像が表示されない 1/30 秒の間に、高解像度映像の移動を終了させる方法である。(詳細は 4 章を参照) また、3 章の実験結果

から、すでに明らかなようにサッカード直前から終了後しばらくの間、すなわちサッカード抑制が働いている間は注視点付近の提示映像の解像度が低くてもそれを認識することができない。そこでこの視覚特性を利用して、液晶シャッターなどにより、任意の時間帯で高解像度映像を遮断できるようにしておき、サッカード抑制が働く間は、高解像度映像は提示せず移動し、広視野映像だけを表示する方法も考えられる。

## 6.8 結言

本章では 2 章から 5 章で行われた実験結果をもとに、NTSC ディスプレイや HDTV のデバイスの使用を想定した視線追従型映像提示システムの設計法について述べた。特に換算視力 1.0 相当の提示系を構成するための、境界を認識できない背景の低解像度領域の視野角とそれに対応する最適高解像度視野角の関係およびその際の伝送容量についての考察、高解像度映像が視線追従して提示される際の時間遅れと映像の提示方法について述べた。さらに、周辺視の変化知覚に関する予備実験結果から、注視時、あるいはサッカードや滑動性眼球運動(スームースペースト)などの眼球運動に対する制御方法について検討した。また、視線追従型映像提示システムを設計する際の視線検出のタイミング、高解像度映像の移動と提示方法について考察した。



## 第7章 結論

### 7.1 研究の総括

本研究では、臨場感の高い遠隔操作を実現するために欠かせない基礎技術の一つとして広視野映像上の視線検出された注視点に小領域の高解像度映像を提示する視線追従型広視野高解像度映像提示システムの実現を目指し、高解像度映像の視線追従に関する人間の視覚特性や、システムの構成方法について研究を行った。各章で得られた結論は次の通りである。

**第1章「結論」**では、ロボットの遠隔操作の重要性と広視野高解像度映像の必要性について論じ、背景となる広視野高解像度映像提示に関する従来技術の現状と問題点について述べた。これらの様々な映像提示方法の中で、研究対象として視線追従型映像提示システムを取り上げ、本研究の目的、研究課題を明らかにした。

**第2章「注視点近傍における静的視覚特性の検討」**では、視線追従型映像撮像・提示システム設計の基礎データを得ることを目的として、広視野映像上の注視点周りの小領域に高解像度映像がスーパーインポーズして提示されるとき、その境界を認識させない高解像度映像の大きさについて評価した結果を述べた。

中心部と周辺部で異なる解像度を有する縦縞模様パターンを表示刺激に用いて、解像度の境界を判別させる実験を行い、こうした視線追従型画像提示系を設計する際に必要な、高解像ディスプレイの大きさを決定するための以下の基礎データを明らかにした。

①中心部と周辺部で解像度の異なる像を提示した場合、解像度の差にかかわらず、中心部高解像度像の幅がある値以上にするとその境界の識別が困難になる。このときの高解像度視野角は、26度から33度である。この特性は人の網膜の生理学的構造に起因すると推定される。

②物理量である空間周波数から感覚量への変換操作を導入することにより、より広範囲の空間周波数に対応した高解像度視野角 $\theta_m$ の変動傾向を推定し

た。

**第3章「注視点近傍における動的視覚特性の検討」**では、視線追従型映像撮像・提示システム設計のために必要な基礎データとして、オペレータが視線移動するとき、その視線追従する高解像度映像の許容できる提示時間遅れについて述べた。

まず眼球運動の種類と特性について論じ、その知見を基にコンピュータグラフィックスによって生成された縞模様画像を視線移動に対してある時間遅れをもって提示する評価実験を行い、視線追従型映像提示システムを設計するために必要な、視線追従に対して許容できる映像提示時間遅れに関する以下のような基礎データを明らかにした。

①映像提示時間遅れの評価実験結果をもとに物理量である解像度を感覚量に変換し、より広範囲の解像度に対応した定時間遅れの変動傾向を推定した。

②NTSCディスプレイを用いて110度の視野角でランドルト視力1.0相当の映像提示を行う場合、被験者が視線を移した後それが違和感なく高解像度であると感じられるためには、サッカーボール終了後、60-80ms以内に高解像度映像が注視点に提示される必要がある。

**第4章「映像提示システムの開発」**では、視線追従型映像提示システムを具体化するために必要な、注視点近傍に高解像度映像を提示する方式を提案するとともに、その試作機を設計し、単純映像を対象とする実験によって提案方式の映像提示手法の妥当性を確認した結果を述べた。視線追従型映像提示システムを具体的に構成するために、プリズム方式、楕円鏡方式、前方投射方式という広視野高解像度映像提示のための3種類の実現方法を考案し検討を行った結果、前方投射方式の有効性を指摘するとともに、システムの構成について、映像の投影方法、高解像度映像の視線追従の方法、視線検出手法について論じた。さらに実験システムを試作してその高解像度映像提示系の評価を行った。まず走査ハーフミラーの応答特性を測定し、それが視線の移動速度に十分追従し得るものであることを確認した。さらに高解像度映像を視線に応じて制御する手法の妥当性を心理物理的実験により確認した。

第5章「映像撮像・提示システムの統合」では、まず視線追従型映像撮像・提示システムを具体化するための映像提示システムと、その提示システムに対応した実環境映像を取得するための映像取得システムの構成方法について検討を行い、4章で検討・試作した映像提示システムをもとにその高解像度映像提示位置を2次元に制御できる試作システムを構成した。またその提示装置に対応した実環境映像を取得するための撮像システムを設計試作し、提示システムと統合したシステムを構築した。次に単眼システムにおける高解像度映像を視線に追従して適切に提示するための条件について検討し、格子状に並んだ9個の指標を用いて高解像度映像提示の評価実験を行った。実験の結果、オペレータの注視点と高解像度映像の提示位置が一致して、その視線方向に一致した映像内容が高解像度映像として提示されていることを確認し、検討・試作した映像取得・提示システムの有効性を確認した。また、オペレータの視線移動に対する高解像度映像の追従性能について、実験中の作業時間を計測した結果、現状のシステムでは、直接視には及ばないが、市販のNTSCディスプレイを視覚提示に用いた場合よりも作業時間が短くなることがわかった。

第6章「視線追従型映像提示システムの設計指針」では、2章から5章で行われた実験結果をもとに、NTSCディスプレイやHDTVのデバイスの使用を想定した視線追従型映像提示システムの設計法について述べた。特に換算視力1.0相当の提示系を構成するための、境界を認識できない背景の低解像度領域の視野角とそれに対応する最適高解像度視野角の関係およびその際の伝送容量についての考察、高解像度映像が視線追従して提示される際の時間遅れと映像の提示方法について述べた。さらに、周辺視の変化知覚に関する予備実験結果から、注視時およびサックードや滑動性眼球運動（スムースパースト）などの眼球運動に対するシステム制御の対処方法について検討した。また、視線追従型映像提示システムを制御設計する際の視線検出のタイミング、高解像度映像の移動と提示方法について考察した。

## 7.2 今後の課題

### 7.2.1 広視野と高解像度の境界について

適用されるアプリケーションによっては、両映像の境界が認識できないことが重要な場合がある。両映像の境界が認識されないようにするには、両映像の内容が境界でスムーズに接合されている必要がある。現状の試作システムにおいては以下に示すような要因により、その接合がずれることがある。

- 1.高解像度映像のカメラ側での撮像方向と提示側での提示位置のずれによって整合が取れない。これは、位置制御の精度や高解像度映像の移動範囲全域でのずれをなくすことが困難なことなどによる。
- 2.カメラ側とディスプレイ側の高解像度映像の位置制御を行うスキャナ等の動特性の違いにより静止状態では整合しても、高解像度映像が視線追従して移動している最中は、位置ずれが起こる。これは同じ型番のスキャナや同じミラーを使用した場合でも、スキャナやアンプの性能の個体差などによって生じる。
- 3.広視野映像上の高解像度が重なる領域には、黒いマスクをかけている。そのマスクの位置と高解像度映像が重なるべき位置がずれると、境界付近でそのマスクが見えることがある。マスクは小さすぎると、高解像度映像と、広視野映像が境界付近で重なって輝度が上がり境界が強調されてしまう。逆にマスクが大きすぎると境界付近でマスクが見えてしまう。
- 4.広視野映像の周辺部では光学システムの特徴から画像のひずみが発生しており、高解像度の映像が広視野映像の端のほうに移動したとき、両映像のひずみ方が違えば境界付近でその連続性が失われる。
- 5.両映像の整合が位置的に一致していても、輝度やコントラスト、色合いが異なると、境界は認識できる。これは、カメラやディスプレイの個体差や個々の機器の調整具合によって発生する場合や、レンズに光が透過するとき光の波長によって焦点距離が異なるため、特に周辺部では色のにじみが見える場合がある。

これらの問題の解決のため高解像度映像の端の領域が広視野映像と少し重なるようにして、解像度を徐々に変化するようにして評価した報告[36]がある。しかしこの方法は、高解像度の領域が狭くなる問題がある。遠隔視覚検査に適用することを考えれば、高解像度領域を減らすことなく、上記の整合が取れ

ない原因について光学設計やシステム設計の改善により、接合を可能な限りスムーズにするほうがよいと考えられる。

### 7.2.2 映像品質について

本研究で試作した実験システムは、提案する視線追従型映像提示システムの有効性を確認することを目的としたとはいえ、たとえば5章で試作したものは視野角 44 度、解像度は視力 0.2 のランドルト環が識別できる程度のもので実用上十分とはいえない。今後の高解像度デバイスの開発、光学設計の改善により、同じ設計思想でより広視野高解像度のものが実現でき、さらに広視野周辺での映像歪みや解像度の低下も同様に改善できると考える。

## 7.3 将来展望

従来の大型の映像提示システムは、移動が困難であるためにその用途が限定されてしまう。本研究で取り上げたような、携帯でき、視覚検査が可能なほどの広視野高解像度映像取得・提示システムの開発によって様々な分野への適用が考えられる。たとえば、このシステムを用いることによって、人間が直接検査するには危険、あるいは困難なところ、具体的にはビルの内部例えばエレベータなどの定期診断、非常に高い橋や建物、地下鉄や新幹線のトンネル、原子力プラント内部の構造材や管の中、壁面などの検査、老朽化が進んだ建造物の診断など様々な環境下での視覚検査に適用することもできる。また、人間の能力を拡張できる利点を生かし、例えば暗いところでは、赤外光を照射したり、暗視カメラを用いて作業したり、液体の中での作業、顕微鏡を使用するような微細作業などへの適用も考えられる。

将来的に、小型で高解像度のデバイスが開発され、また光学レンズ設計の進歩により、システムをより軽量化できれば HMD への搭載などにより、適用範囲はさらに広がると考えられる。特にシースルー型 HMD へ搭載できれば、オーグメンティドリアリティ (AR) における焦点問題を解決できる可能性がある。オーグメンティドリアリティは、実環境に人工環境を重ね合わせて利用する技術で、現場で作業している人にマニュアルを提示したり、設計図を原寸大で実環境に重ね合わせたりできる。そして焦点問題とは、実環境と人工環境を重ね合わせて提示した

とき、一方にしか焦点が合わなくなる現象である。視線追従方式では、実環境を撮像するカメラのオートフォーカス機能およびオペレータの視線検出した結果得られる輻輳角から注視している物体までの距離を知ることが可能である。その情報を基に人工環境を提示する仮想スクリーンの位置を制御することができれば、仮想スクリーンの可動範囲内では、この焦点問題は解決できる。さらにシースルー型 HMD を使用してオーグメンティドトレイグジスタンスへの適用を考慮すれば、トレイグジスタンスでは、通常オペレータとロボットの距離は遠く離れているため、実環境を提示するためのロボットとオペレータ間の伝送容量は少ないことが望まれるが、オーグメンティドトレイグジスタンスでは、それに加えて人工環境を提供する計算機とオペレータ間の伝送容量も少ないことが望まれる。この点においても伝送容量を抑えられる特徴を持つ視線追従型の映像提示方式は有利と思われる。その他、視線検出や瞬きの検出などの機能は、様々な心理物理実験への応用や、視線によるコマンド入力などインターフェースの手段としての応用も考えられる。

## 7.4 まとめ

本論文は、遠隔操作映像提示技術の中でも、小型の広視野高解像度映像提示システムの重要性を主張し、その実現に向けて段階的な研究課題を設定し、その実現に向けて段階的な研究課題を設定し、その設定した研究課題に対して基本的なアイデアに沿って具体的な解決を行い、被験者を用いた評価実験、システムを試作してその有効性を確認する実験を実施している。

本論文は、映像提示技術の中でも小型で、広視野高解像度映像提示するために視線追従方式を用いて NTSC 方式のデバイスでも広視野高解像度を映像を提示できる先導的な研究であり、この成果により今後より迫真性の高い映像提示環境を構築する研究を進めるための基礎的な環境を提供することができたと考えている

## 謝辞

本論文の作成にあたって暖かいご激励とご鞭撻ならびに懇切なるご指導をいただいた，東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻 舘暉教授に深い感謝の意を表します。また本研究をまとめる段階で，広い範囲にわたって有益なご助言を数多く賜りました東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 廣瀬通孝教授，東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻 満淵邦彦教授，東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 広田光一助教授，東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻 川上直樹講師に深く感謝いたします。

本論文をまとめるにあたって，貴重なご助言と多大なご指導を承りました産業技術総合研究所評価部谷江和雄主席評価役（前知能システム研究部門長）ならびに産業技術総合研究所知能システム研究部門フィールドシステム研究グループ小森谷清研究グループ長に深い感謝の意を

表します。

本研究を遂行するうえで暖かい激励と研究費などの面で多大な支援をいただいた通商産業省機械技術研究所ロボット工学部野崎武敏元部長，大山尚武元部長に厚くお礼申し上げます。また，本研究を進める上で貴重なご助言をいただいたNTTコミュニケーション基礎科学研究所前田太郎主幹研究員（元機械技術研究所ロボット工学部バイオリボティクス研究室員）ほか，実験にご協力いただいた機械技術研究所ロボット工学部バイオリボティクス研究室員，産業技術総合研究所知能システム研究部門人間共存システム研究グループ研究員，フィールドシステム研究グループ研究員各位に謝意を表します。この他，実験装置の製作にご協力いただいた，浜松ホトニクス株式会社 市江更治氏、安川学氏、堀口千代春氏，シグマ光機株式会社 高田将弘氏に謝意を表します。

## 参考文献

- [1] 舘暲, 小森谷 清, 澤田一哉, 井床利之, 井上幸三, HRP 遠隔操作プラットフォーム, 日本ロボット学会誌, Vol. 19 No. 1 pp. 16-27, 2001
- [2] 福井幸男, 下条誠, 視覚と触覚の情報呈示について, 人間工学, Vol.29 No.3, pp. 141-146, 1993.
- [3] 舘暲, 荒井裕彦, テレグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価, 日本ロボット学会誌, Vol.7 No4 pp.50-62, 1989
- [4] 前田太郎, 荒井裕彦, 舘暲, 頭部運動追従型両眼視覚提示装置の設計と評価, 日本ロボット学会誌, Vol.10 No.5, pp.655-665, 1992
- [5] 舘暲, 人工現実感 Telexistance and Virtual Reality, 日刊工業新聞社, 1992
- [6] 山田宏尚, 杉本洋彰, 武藤高義, 遠隔操作・臨場感提示建設ロボットの研究 (CG を利用した仮想空間の提示), 第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2002
- [7] 畑田豊彦, 人工現実感に要求される視空間知覚特性, 人間工学, Vol.29 No.3 pp.129-134, 1993.
- [8] 矢野澄男, 立体画像表示における画角の影響, テレビジョン学会誌, Vol.45 No.12 pp.1589-1596, 1991
- [9] 谷千束, IT 革命とディスプレイビックバン, 月刊ディスプレイ'01, 1 月号
- [10] 谷千束, 高臨場感を目指すディスプレイトレンド, 月刊ディスプレイ'00, 1 月号.
- [11] Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin, Thomas A. DeFanti, Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, COMPUTER GRAPHICS Proceedings, Annual Conference Series, SIGGRAPH 93, pp.135-142, 1993.
- [12] 廣瀬通孝, 小木哲朗, 石綿昌平, 山田俊郎, 多面型全天周ディスプレイ (CABIN) の開発とその評価, 電子情報通信学会論文誌, D-II Vol.J 81-D-II, No.5, pp.888-896, 1998
- [13] 續元宏, 岩田洋夫, 巡回式高解像度実画像ディスプレイ, 日本 VR 学会論文集, Vol.7 No.1 pp.49-58, 2002
- [14] 柴野伸之, 畑中智行, 中西弘泰, 星野洋, 長濱龍一郎, 澤田一哉, 野村淳二, 都市環境ヒューマンメディアにおける球型没入ディスプレイ, 日本 VR 学会論文集, Vol.4 No.3, pp.549-554, 1999
- [15] 稲見昌彦, 川上直樹, 柳田康幸, 前田太郎, 舘暲, マクスウェル光学系による広視野立体ディスプレイ, 日本 VR 学会論文集, Vol.4 No.1, pp.287-294, 1999
- [16] 柳田康幸, 前田太郎, 舘暲, 固定スクリーン型視覚提示装置を用いたテレグジスタンス視覚系の構築手法, 日本 VR 学会論文集, Vol.4 No.3 pp.539-548 1999
- [17] Scott A. Nelson, CVC HMD-next generation high -resolution head-mounted display, SPIE, Vol.2218, pp.7-16
- [18] Jiantao Ma, John M.Hollerbach, Ian W.Hunter, Optical Design for a Head-Mounted Display, PRESENCE, Vol.2 No3, pp.185-202, 1993
- [19] 高橋浩一, 偏心光学系による広画角 HMD, 光技術コンタクト, Vol.33 No8, pp.434-440, 1995
- [20] 山崎章市, 猪口和隆, 斎藤義広, 森島英樹, 谷口尚郷, 自由曲面プリズムを搭載した薄型広画角 HMD とその応用, 日本 VR 学会論文集, Vol.4 No.1 pp.281-286, 1999
- [21] 廣瀬通孝, 佐藤慎一, 横山賢介, 広田光一, 人工現実感技術を用いた視覚的臨場感の伝達, 計測自動制御学会論文集, Vol.33 No.7, pp.716-722, 1997
- [22] 森島英樹, 秋山健志, 難波則広, 田中常文, 非対称非球面ミラーを用いた Off-Axial HMD 光学系の設計, 第 20 回光学シンポジウム予稿集, pp.53-56
- [23] 木島竜吾, 山田英治郎, 小鹿丈夫, - Reflex HMD -前庭反射機能を備えた HMD の開発, 日本 VR 学会論文集, Vol.6 No.2 pp.107-114 2001
- [24] 家庭用ヘッドマウントディスプレイ, 懸念される人体への影響, 日経エレクトロニクス, no.618 pp.67-83, 日経 BP 社, 1994.9.26
- [25] H. Veron, P. J. Hezel, D. A. Southard, Head Mounted Displays for Virtual Reality, SPIE Vol. 2218, pp.41-50
- [26] Micheal Tidwell, Richard S. Johnston, David Melville, Thomas A. Furness III, The Virtual Retinal Display-A Retinal Scanning Imaging System, VIRTUAL REALITY WORLD 95, pp.325-333, 1995.
- [27] 杉原敏昭, 宮里勉, 中津良平, 焦点調節補償機能を有する HMD : 3DDAC Mk.4, 日本 VR 学

- 会論文集, Vol.4 No.1, pp.261-268, 1999
- [28]前田太郎, テレイグジスタンス研究における HMD, 光学, 25 卷 1 号, pp.14-20, 1996.
- [29]古賀一男, 眼球運動実験ミニハンドブック, pp.15-24, pp. 83-94, (財) 労働科学研究所出版部, 1998
- [30]渡部叡他, 視覚の科学, pp.20-25 pp.41-47, 写真工業出版社, 1981
- [31] 樋渡涓二, 生体情報工学, 91-99, コロナ社, 1971
- [32]野呂影勇, 図解エルゴノミクス, pp.154-155, p.292, 日本規格協会, 1990
- [33]田崎京二他, 視覚情報処理, 朝倉書店, pp.368-371, 1984
- [34] V.Virse, R.Nasane, Cortical magnification factor predicts the photopic contrast sensitivity of peripheral vision, *Nature*, 271, 54-56, 1978
- [35]JOYCEL.KERR, Visual resolution in the periphery, *Perception & Psychophysics*, Vol.9, pp.375-378, 1971.
- [36]山口博幸, 判野明, 岸野文郎, 視線検出を利用する広視野高精細表示方法の検討, 信学論(C-II), vol. J73-C- II, No.11, pp.721-732, 1990
- [37] N.M.Dalton, C.S.Deering, Photo Based Image Generator, *SPIE Vol.1116 Helmet-Mounted Displays*, pp.61-75, 1989
- [38]Breglia et al, HELMET MOUNTED DISPLAY, United States Patent 4439157, 1984
- [39]Lewis, HIGH-RESOLUTION VISION SYSTEM, United States Patent 4028725, 1977
- [40]A. Yoshida, J. P. Rolland, J. H. Reif: Design and Applications of a High -Resolution Insert Head-Mounted-Display, *Proc. of Virtual Reality Annual International Symposium '95*, pp.84-93, IEEE Computer Society Press, 1995
- [41]山崎章市, 奥山敦, 石野俊樹, 藤原昭広, 为国靖宏, 視線入力を搭載した超小型HMDの開発, 3D Image Conference, pp.70-75, 1995
- [42]山崎章市, 視線入力を搭載した超小型 HMD, 光学, 25 卷, 1 号, pp.2-7, 1996.
- [43]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, *Human Interface*, Vol.11 pp197-202, 1996
- [44]福島省吾, 吉川榮和, Eye-Sensing HMD の開発とその視点入力への応用, *Human Interface*, vol.12 pp.129-134, 1997.
- [45]福島省吾, 新井豪, 森川大輔, 下田宏, 吉川榮和, Eye-Sensing Head Mounted Display の開発, 計測自動制御学会論文集, vol.34 no.1 pp.1-9, 1999
- [46]鈴木謙二, カメラの視線入力 AF 技術, 光学, 第 23 卷 第 1 号, pp.25-26, 1994
- [47]鈴木謙二, カメラの視線入力技術の開発, 精密工学会誌, vol.61 No.1 pp.35-39, 1995.
- [48]合志和晃, 松永勝也, 永田裕樹, 松ヶ下勇人, 志堂寺和則, 中心視用に高精細画像をもつデジタル複合画像立体映像システムの開発, *日本 VR 学会誌*, Vol.6 No.1 pp.49-56, 2001
- [49]日本視覚学会編, 視覚情報処理ハンドブック, (株)朝倉書店, pp.408-413, 2000
- [50] 苧坂良二, 中溝幸夫, 古賀一男, 眼球運動の実験心理学, 名古屋大学出版会, pp.104-108, 1993
- [51]河野隆志, 鈴木元, 視点適応型表示の検討, 9th Symposium on Human Interface, pp.593-598, 1993.
- [52]笠井健, 眼球運動の制御機構, 計測と制御, 19 卷, 8 号, pp.12-23, 1980.
- [53] 田中良久, 心理学的測定法, pp.34-48, 東京大学出版会, 1971
- [54]谷江和雄, 前田太郎, 市江更治, 安川学, 眼球運動追従型視覚提示装置, 特許公開 6-326946
- [55]前田太郎, 谷江和雄, 視線追従型ヘッドマウントディスプレイ, 特許公開 6-38142
- [56]伴野明, 視線検出のための瞳孔撮影光学系の設計法, 信学論(D- II ), Vol. J74-D- II , No.6, pp.736-747, 1991
- [57]伴野明, 視線検出のための瞳孔撮影光学系の設計法, 信学論(D- II ), J74-D- II , 6, pp.736-747, 1991
- [58]伴野明, 岸野文郎, 顔と瞳孔の 3 次元計測に基づく注視点アルゴリズム, 信学論(D- II ), J75-D- II , no.5, pp.861-872, 1992
- [59]伴野明, 飯田宗夫, 小林幸雄, 非接触検出のための特徴点抽出法, 信学技報, PRU88-73, pp.17-24, PRU95-233, pp.131-136, 1996
- [60]大野健彦, 武川直樹, 吉川厚, 眼球形状モデルに基づく視線測定法, 第 8 回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.307-312, 2002
- [61] 山田光穂, 最近の眼球運動の研究動向, 信学技法, MBE95-132 NC95-90, pp.145-152, 1995.12

## 関連発表リスト

### (誌上発表)

- 1)岩本和世、前田太郎、谷江和雄, "視線追従型映像提示系への応用を目的とした注視点近傍における視覚特性の検討", 人間工学会誌, Vol.30, No.2, pp.99-109, 1994.4
- 2)岩本和世、谷江和雄、前田太郎, "視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発－注視位置に高解像度像を提示する映像提示方式の検討－", 電子情報通信学会論文誌 Vol.J79-D- II, No.5, pp.879-888, 1996.5
- 3)Kazuyo Iwamoto, Kazuo Tanie, Taro Maeda, "A Head-Mounted Eye Movement Tracking Display and its Image Display Method", Systems and Computers in Japan, Vol.28, No.7, pp.89-99, 1997.7
- 4)岩本和世, 小森谷清, "遠隔操作用視線追従型映像取得・提示システムにおける注視点近傍の高解像度映像提示の評価", ロボット学会誌 Vol.22, No.4, pp.471-478, 2004.5
- 5)岩本和世, 小森谷清, "視線追従型映像提示システムにおける視線移動に対して許容できる映像提示時間遅れの検討", 人間工学会誌 Vol.40, No.1, pp. 39-47, 2004.2

### (Proceedings 論文)

- 1)K.Iwamoto, K.Tanie, T.Mameda, K.Ichie, M.Yasukawa, C.Horiguchi, "Development of an Eye Movement Tracking Type Head Mounted Display :System proposal and evaluation experiments", Proceedings of IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN 93), pp.287-291, 1993.11
- 2)Kazuyo Iwamoto, Satoshi Katsumata, Kazuo Tanie, "An Eye Movement Tracking Type Head Mounted Display for Virtual Reality System:-Evaluation Experiments of Proto-type System-", Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 94), pp.13-18, 1994.10.2

3)Kazuyo Iwamoto, Kazuo Tanie, "High resolution, wide view angle Head Mounted Display using eye movement tracking : -System structure and evaluation experiments-", Proceedings of IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN 95), pp.289-294, 1995.7.6

4)Kazuyo Iwamoto, Kazuo Tanie, "Binocular Head Mounted Display with Eye Movement Tracking Function:- Development of the Prototype and Its Application-", Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'96), pp.354-359, 1996.11.5

5)Kazuyo Iwamoto, Kazuo Tanie, "Development of an Eye Movement Tracking Type Head Mounted Display:-Capturing and Displaying Real Environment Images with High Reality-", Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA'97), pp.3385-3390, 1997.4.24

6)Kazuyo Iwamoto, Kiyoshi Komoriya, Kazuo Tanie, "Eye Movement Tracking Type Image Display System for Wide View Image Presentation with High-resolution - Evaluation of High-resolution Image Presentation -", Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2002 EPFL, Switzerland), pp.1190-1195, 2002.10.3

7)Kazuyo Iwamoto, Kiyoshi Komoriya, "Permissible Time Delay for Image Following in an Eye Movement Tracking Type Image Display System", Proceedings of The 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-8), pp.889-906, 2004.3

### (解説)

- 1)岩本和世, 視線追従型ヘッドマウントディスプレイ, 光アライアンス, pp.29-32, Vol.6 No.12, 1995
- 2)岩本和世, 視線追従型 HMD, 光学, pp.31-32, Vol.25 No.1, 1996

## (口頭発表)

- 1)岩本和世、前田太郎、谷江和雄、視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発 (第 1 報方式の提案と高解像度視野角の推定), 日本ロボット学会第 10 回学術講演会, 1992.11.2
- 2)岩本和世、谷江和雄、前田太郎、市江更治、安川学、堀口千代春、視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発 (第 2 報試作 1 号機の構成), 日本ロボット学会第 11 回学術講演会, 1993.11.13
- 3)岩本和世、人間感覚評価のための人工現実感創出技術の研究, 産業科学技術研究成果報告会, 1993.11.18
- 4)岩本和世、視線追従型ヘッドマウントディスプレイの試作, メカトロニクス研究総合推進会議第 10 回総会研究発表会, 1993.12.8
- 5)岩本和世、勝又聡、谷江和雄、視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発 (第 3 報高解像度映像提示の一手法), ロボットメカトロニクス講演会 94, 1994.7.1
- 6)岩本和世、谷江和雄、視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発 (第 4 報視線追従の 2 次元化), 日本ロボット学会第 12 回学術講演会, 1994.11.20
- 7)岩本和世、谷江和雄、視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発 (第 5 報両眼システムの構成), 日本ロボット学会第 13 回学術講演会, pp661-662, 1995.11.4
- 8)岩本和世、視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発 (視線追従の 2 次元化), 人間工学サミット, 1995.2.6
- 9)岩本和世、成田奨、神徳徹雄、谷江和雄、モデルベースト画像処理を用いた視線検出に関する研究, 第 5 回ロボットセンサシンポジウム, pp.79-82, 1996.4.19
- 10)岩本和世、谷江和雄、視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発 (第 7 報 実環境映像の取得と提示), 日本ロボット学会第 14 回学術講演会, pp.431-432, 1996.11.2
- 11)岩本和世、谷江和雄、視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発 (第 8 報 撮像系と提示系の開発), 日本ロボット学会第 15 回学術講演会, 1997.9.14
- 12)岩本和世、谷江和雄、視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発 (第 9 報 ステレオ映像の提示), 日本ロボット学会第 16 回学術講演会, 1998.9.16
- 13)岩本和世、谷江和雄、視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発 (第 10 報 HMD 装着中のずれに対する視線検出の検討), ロボットメカトロニクス講演会 00, 2000.5.12
- 14)岩本和世、小森谷清、谷江和雄、視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発 (第 11 報高解像度映像提示の評価), 日本ロボット学会第 19 回学術講演会, pp.27-28, 2001.9.18
- 15)岩本和世、小森谷 清、谷江 和雄、視線追従型映像提示装置を用いた高解像度映像提示の評価, 第 7 回ロボティクスシンポジア, 長野、2002.3.18
- 16)岩本和世、小森谷 清、視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発 (第 12 報 高解像度画像提示の遅れ許容時間), 第 20 回 日本ロボット学会学術講演会, 2002.10.12
- 17)岩本和世、小森谷 清、視線追従型映像提示システムにおける高解像度映像追従の許容時間遅れ, 第 8 回ロボティクス・シンポジア, 2003.3.17

## (講演)

- 1)K.Iwamoto, "Research on new type of Head Mounted Display", 2nd Workshop on Synthetic World (Paris), 1995.1.26



2)岩本和世, 視線追従型ヘッドマウントディスプレイ, 第 4 回先端ディスプレイシステム調査研究委員会, 1996.10.18

3)岩本和世, 視線追従型ヘッドマウントディスプレイ, 第 37 回機械技術研究所研究発表会研究講演会 ロボティクスの最近の成果, 1997.6.18

### (特許)

1)岩本和世,谷江和雄, "視線追従方式による広視野高解像度映像提示装置", 特開平 8-313843, 1996.11.29

2)岩本和世, "投射方式による眼球運動追従型視覚提示装置", 特許登録第 2507913 号, 1996.4.16

3)岩本和世, "画像ディスプレイ装置", 特許登録第 2099165 号, 1996.10.22

4)岩本和世, "広視野映像提示装置", 特許登録第 3240362 号, 2001.10.19

5)岩本和世, "Eye Movement Tracking Display", 5635947 (アメリカ), 1997.1.3

6)岩本和世, "Wide View Angle Display Apparatus", 410757 (アメリカ), 1997.12.9

## 付録 A

第 1 章 結論にて議論した換算視力の計算方法を示す。

### A.1 換算視力とハイビジョン映像

Fig. A.1 に示すように人の視力  $V$  は、知覚できる標準図形（ランドルト環）の切りかきの最大幅を見込む視野角を  $\beta$  分とするとき、次式によって定義される。

$$V = 1/\beta$$

この定義を参考にディスプレイに表示される映像がどの程度明瞭に表示されているかを示す尺度として、換算視力を次のように定義する。すなわち、ディスプレイの画素の最小幅を 1 とすれば、表示し得るランドルト環の切欠きの最小幅は 1 となる。そしてまたこの 1 は視力のよい人でも知覚できる最小ランドルト環切欠き幅となるから、Fig. A.2 に示すようにこの 1 を見込む角度を  $\beta'$  分とする時、次式の  $V'$  を換算視力とする。

$$V' = 1/\beta'$$

この  $\beta'$  はディスプレイの全画面を見込む視野角を  $\beta'w$ 、画面の一次元画素数を  $S_n$  とすれば、近似的に次式で計算することもできる。

$$\beta' = \beta'w / S_n$$

一般に我々が用いている TV モニタの方式である NTSC 方式の画素の数は  $525 \times 525$  と仮定すれば、このとき人の視覚系の全視野を 80 度としこれをカバーする NTSC 方式ディスプレイを用いる場合の換算視力は、上式から

$$(1/\beta') = 1 / (80 \times 60 / 525) = 0.109$$

となる。またたとえ走査線数 2000 本の高品位ディスプレイを用いたとしても、同様に計算される換算視力は 0.417 程度である。

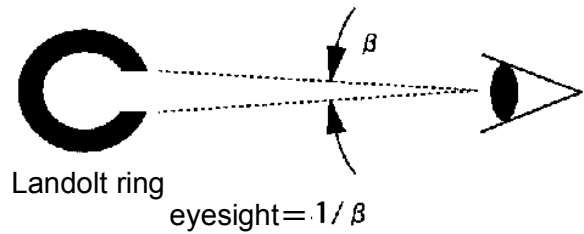


Fig.A.1 Calculation of eyesight

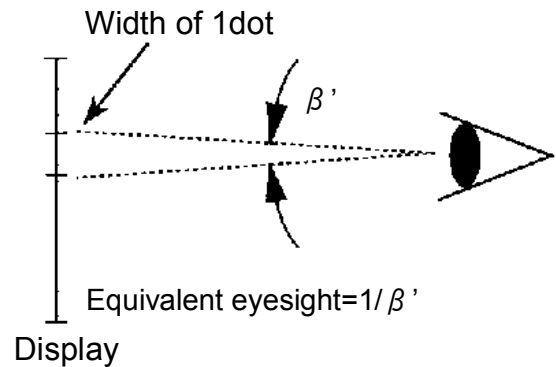


Fig. A.2 Equivalent eyesight

## 付録 B

**第 5 章 映像撮像・提示システムの統合**で試作した映像提示・取得システムの両眼システムにおけるステレオ視について検討し、実環境映像を用いて、評価実験を行った結果を述べる。

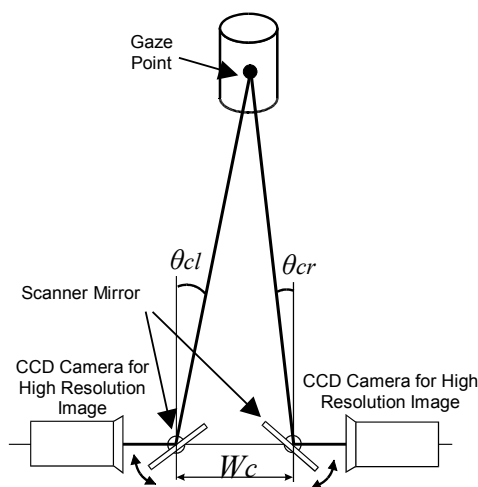
### B.1 ステレオ映像の提示条件

映像提示装置を用いてロボットの遠隔操作などを行う場合に、作業内容によっては映像の視野角や解像度だけでなく奥行き感覚が重要となる場合がある。本研究で進めている映像取得・提示システムにおいてもステレオ映像提示を行った際、どの程度の奥行き感覚が得られるかを確認する必要がある。本システムでは、オペレータの注視点まわりの小領域に高解像度映像を視線追従させて提示する。そのため、オペレータは主にこの高解像度映像をもとに奥行き感を得ることになる。Fig.B.1, B.2 はそれぞれステレオ映像取得・提示を行う際の映像取得装置および映像提示装置における角度関係を示している。高解像度映像用 CCD カメラの映像取得方向  $\theta_{cl}$ ,  $\theta_{cr}$  は、その直前のスキャナミラーによって制御することができる。Fig.B.2 の映像提示装置は実際には接眼レンズを通して空間平面上に結像された映像を見ているが、オペレータの前方に配置されたスクリーンに投影された映像を見ているのと等価である。この仮想スクリ

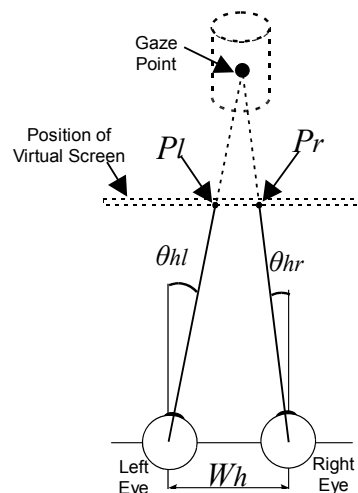
ーンに提示された広視野映像上の高解像度映像の提示位置  $P_l$ ,  $P_r$  は、装置内のスキャナミラーの角度を制御することにより、任意の位置に提示可能である。 $P_l$ ,  $P_r$  を注視しているときのオペレータの視線方向を  $\theta_{hl}$ ,  $\theta_{hr}$  とする。ここでは、簡単のため高解像度映像が水平方向に制御できる場合について考察する。ここで映像取得装置の左右システム間の距離  $W_c$  は、映像提示装置のオペレータの瞳孔間距離  $W_h$  に等しくなるように設定した。また、スキャナミラーと CCD カメラの距離は、注視する物体の距離に比べて十分小さいとする。このとき次の式を満たすように制御すれば、視線方向に関してオペレータは直接視で見ると同様の角度関係を保つことができる。

$$\theta_{hl} = \theta_{cl}, \theta_{hr} = \theta_{cr} \quad (\text{B.1})$$

Fig.B.1, B.2 からこのシステムでは、視線が水平方向に動いた場合でも(B.1)式の関係を保つことができることがわかる。また CCD カメラの光軸を常に視線方向と一致させるように制御するので、オートフォーカスの CCD カメラであれば提示映像のピントはボケず、高解像度を保つことができる。本システムにおける広視野映像の水平画角は約 70 度、高解像度映像の水平画角は可変だが今回は約 14 度として設定した。



**Fig.B.1** Angles Relations for Image Capture System



**Fig.B.2** Angles Relations for Image Display System

## B.2 奥行き感覚の評価

ステレオ映像を提示した際の奥行き感を評価するために、Fig.B.3に示すような深視力（奥行き感）検査装置を用いた。これは運転免許（大型や二種など）の適性検査で使用されているもので、30mmの間隔で3本の直径3mmの黒棒が配置されており、中央の棒のみ被験者に対して奥行き方向に移動できる。被験者は黒い長方形の窓枠を通して3本の棒を注視する。そして中央の棒を奥から手前にあるいは手前から奥に移動させ、3本の棒が並んだと感じたところで停止し、そのズレを計測する。被験者と固定棒との距離は2.5mである。運転免許の適性検査においては3回の検査のズレの平均が20mm以内で合格とされている。本実験においては、中央の棒を後方より前方へ移動させ、被験者が3本の棒が並んだと感じたところで停止し、そのズレを測定した。ただし、棒の停止後でも被験者が一列に並んでいないと感じる場合は実験をやり直した。被験者は、直接視による視力検査、深視力検査とも正常な男女各1名である。実験結果をTable B.1に示す。この表では2名の被験者について直接視および映像取得・提示装置を介した場合で、検査を3回ずつ行った結果とその平均値を示している。(+)のデータは中央の黒棒が他の棒に比べて手前にあり、(-)のデータは奥にあることを示している。検査装置は映像取得装置の正面2.5mの位置に配置した。結果から映像提示・取得装置を介して深視力検査を行った場合、黒棒が

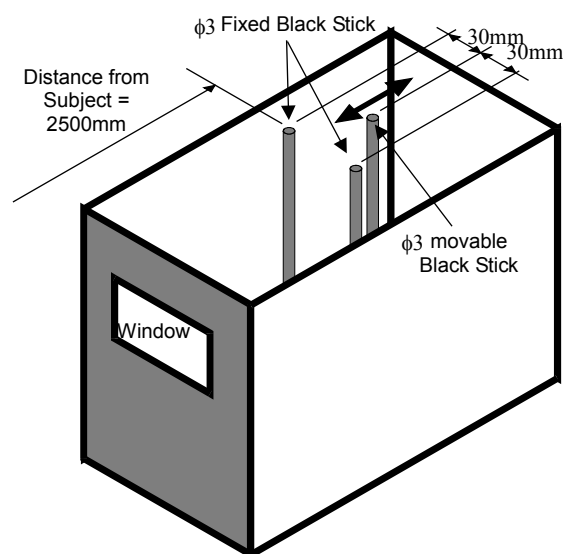


Fig.B.3 Testing device for depth perception

奥行き方向に移動していることは容易に認識ができ、ズレは直接視に比べて多少大きくなるものの、運転免許の適性検査に合格できる程度の奥行き感が得られることが確認できた。

本節で用いたシステムにおけるカメラ側の広視野の視野角は水平単眼で約70度であるが、そのうち視線が移動できる範囲は実測で提示映像中心から約±15度程度であった。そこで深視力検査装置を映像取得装置からみて距離2.5mで右15度、左15度の位置に配置し、同様の実験を行った結果、両眼視が可能でかつ奥行き感覚が得られることを確認した。

Table B.1 Experimental results

		Subjects	
		K.O	K.T
Direct Watch	1 <sup>st</sup> Trial	+3	-7
	2 <sup>nd</sup> Trial	+3	+7
	3 <sup>rd</sup> Trial	+4	-3
	Average	+3.3	-1
Using Image Capture / Display	1 <sup>st</sup> Trial	+15	+7
	2 <sup>nd</sup> Trial	-8	-10
	3 <sup>rd</sup> Trial	+25	-20
	Average	+10.7	-7.7

## 付録 C

第5章 映像撮像・提示システムの統合 5.2.2 軸別制御方式の特性で述べた、高解像度映像 CCD カメラの物体を見る角度が広視野映像用カメラからみた角度と異なる点についてさらに検討する。

### C.1 ミラーが1枚の場合

まず、構造を単純化して広視野映像用 CCD カメラを省き、高解像度映像用カメラのみを考え、ミラーが1枚の状態を検討する。Fig. C.1 のように、CCD カメラ位置からミラーを反射した物体を見ているとき、この CCD カメラから物体を見る角度は図の点線で示された位置にカメラをおいた場合と同じである。(ただし撮像される映像は反射像かそうでないかの差はある。) これをここでは、等価なカメラ位置とする。この状態をミラー回転軸を原点とする  $xy$  座標系で考えると Fig.C.2 のようになる。ここでミラー反射点と高解像度映像用カメラの距離を  $la$ 、カメラの位置を  $(x_0, y_0)$ 、等価なカメラ位置を  $(x_1, y_1)$  とする。原点を通る直線  $y = \tan \theta * x$  はミラー面であり、ミラーの回転は角度  $\theta$  の変化に相当し、原点を中心に回転する。すると  $\theta = -45$  度のとき、カメラの光軸は  $y$  軸と一致することになる。このとき原点と  $(x_1, y_1)$  の距離は  $la$ 、原点と  $(x_1, y_1)$  を通る直線と  $x$  軸がなす角は  $2\theta$  であるから、

$$x_1 = la * \cos 2\theta \quad (C.1)$$

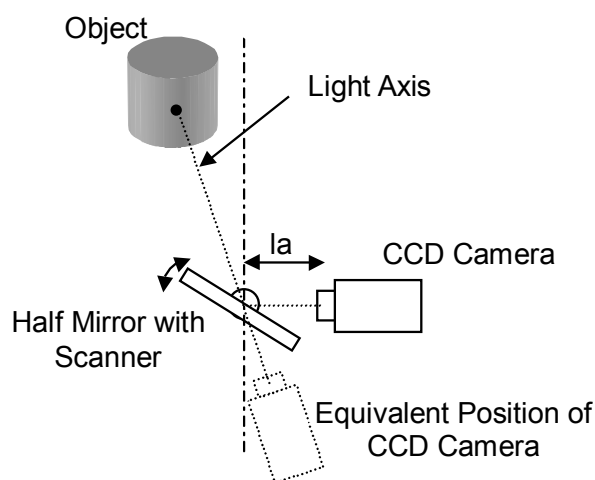


Fig.C.1 Image Capture System

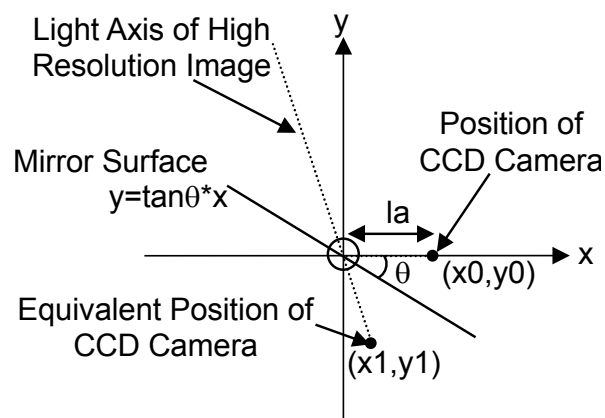


Fig.C.2 xy coordinates

$$y_1 = la * \sin 2\theta \quad (C.2)$$

式(C.1) (C.2)より

$$x_1^2 + y_1^2 = la^2 \quad (C.3)$$

となり、 $\theta$  が変化すれば  $(x_1, y_1)$  の軌跡は原点を中心とした半径  $la$  の円となる。すなわちこの軌跡上を等価なカメラ位置が移動することがわかる。このとき、広視野映像用 CCD カメラが、 $y$  軸上  $(0, -la)$  の位置にあって、 $y$  軸+方向に向いているとすると、ミラー角度  $\theta = -45$  度のとき以外は広視野と高解像度映像用 CCD カメラがそれぞれ物体を見るとききの角度は異なることがわかる。

### C.2 ミラーが2枚の場合

前節で検討した現象は、ミラーが2枚ある場合でも発生する。Fig.C.3 に示すように、撮像システムの機器が配置されているとする。この図の状態では広視野映像用 CCD カメラと高解像度映像用 CCD カメラの光軸は一致しているものとする。そして、高解像度映像用 CCD カメラの光軸がミラーで反射する点を B 点、ハーフミラーで反射する点を A 点とし、そのとき A 点を原点として図中に示すように  $x'y'z'$  座標系を設定する。Fig.C.4 は、その  $y'z'$  平面 ( $x'=0$ ) を示している。A 点と B 点の距離

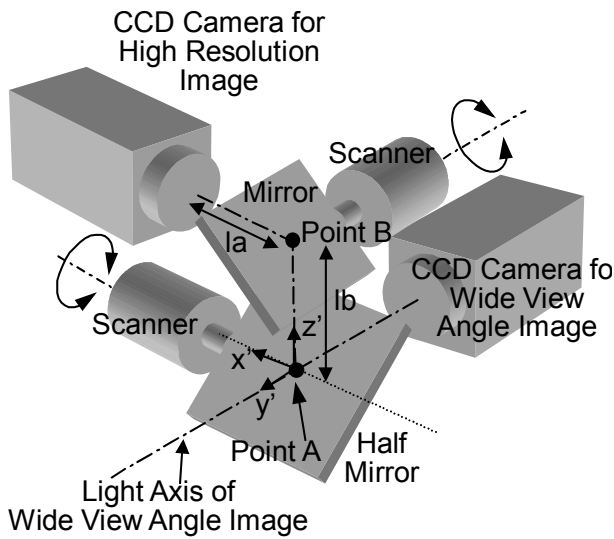


Fig.C.3 2 Dimensional Structure of Image Capture System

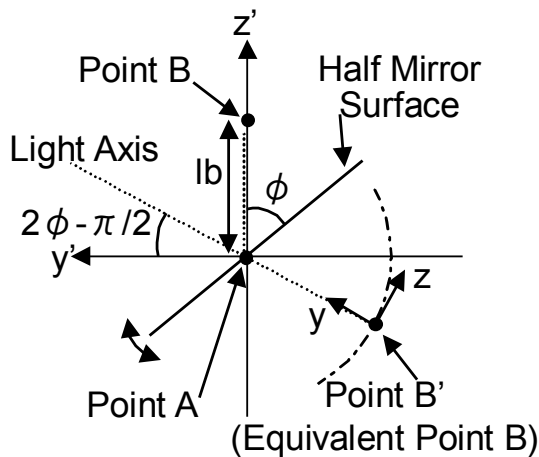


Fig.C.4  $y'z'$  coordinates

を  $lb$ , ハーフミラーの角度を  $\phi$  とする.  $\phi$  が変化すると, 前節で検討したのと同様に, 等価的な B 点 (ここでは B' 点とする) の軌跡は,  $y'$  軸  $z'$  軸を含む平面上の原点を中心とした半径  $lb$  の円を描くことになる. ここで, Fig.C.5 に示すように B' 点を原点として新たに  $xyz$  座標系を設定する. B' 点から A 点を見た方向に  $y$  軸,  $x$  軸を  $x'$  軸と平行にする. このようにすれば, ミラーを回転させたときの等価なカメラ位置を算出するには, 前節の計算式をそのまま使用できる. このとき  $xyz$  座標系から  $x'y'z'$  座標系への変換は,

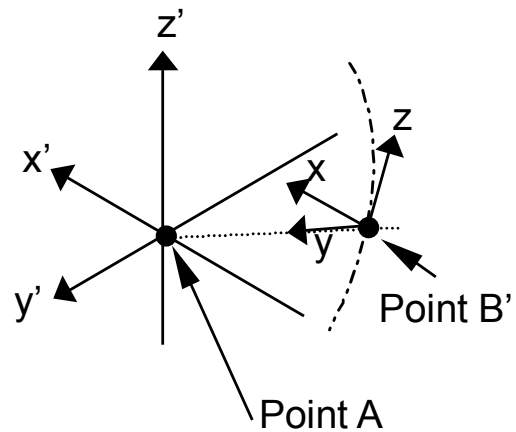


Fig.C.5 Relation of 2 Coordinates

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(2\phi - \pi/2) & \cos(2\phi - \pi/2) \\ 0 & \cos(2\phi - \pi/2) & -\sin(2\phi - \pi/2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ lb \cdot \sin 2\phi \\ lb \cdot \cos 2\phi \end{pmatrix}$$

(C.4)

となる. この式(C.4)に式(C.1)(C.2)および  $z=0$  を代入すると, 求める等価なカメラ位置は,

$$x' = la \cdot \cos 2\theta \quad (C.5)$$

$$y' = la \cdot \sin 2\theta \cdot \cos(2\phi - \pi/2) + lb \cdot \sin 2\phi \quad (C.6)$$

$$z' = la \cdot \sin 2\theta \cdot \sin(2\phi - \pi/2) + lb \cdot \cos 2\phi \quad (C.7)$$

$$y' = la \cdot \sin 2\theta \cdot \sin 2\phi + lb \cdot \sin 2\phi \quad (C.6')$$

$$z' = -la \cdot \sin 2\theta \cdot \cos 2\phi + lb \cdot \cos 2\phi \quad (C.7')$$

で与えられる.

すなわち, ハーフミラーが回転したときのミラーの反射点 B の等価な位置 (B' 点) は  $y'z'$  平面状の原点を中心とした半径  $lb$  の円を描き, ミラーが回転したときの高解像度映像用 CCD カメラの等価な位置は B' 点を原点とする  $xy$  平面上の原点 (B' 点) を中心とした半径  $la$  の円を描くことになる. そのカメラの光軸はカメラ位置から, B' 点,  $x'$  軸上の 1 点を通る直線となる. このことは両 CCD カメラの光軸が一致する, すなわち  $\theta$  と  $\phi$  がともに  $-45$  度となるところでは, ある物体を見る角度は同じだが, それ以外のところでは同じ物体をそれぞれ異なる角度から見た映像をとらえることを示している.

## 付録 D

第 4 章 映像提示システムの開発, 第 5 章 映像撮像・提示システムの統合にて試作したシステムのスペックの概要を以下に示す.

### D.1 4章で試作した提示システムの仕様

システムの外觀図を Fig.D.1 に, 概略寸法と配置図を Fig.D.2 に示す.

#### D.1.1 概要

- ・広視野映像の視野角：水平・垂直方向共 46 度
- ・高解像度映像の視野角：水平・垂直方向共 14 度  
ただし高解像度映像の視野角は, 光学システムのレンズ焦点距離や配置位置を変えることにより変更できる.
- ・広視野および高解像度映像の解像度：15 万画素 (縦 238\*横 634)

#### D.1.2 主な使用デバイス

- ・ディスプレイ：  
液晶カラーテレビ LVD303(セイコー社製)  
5.3 型透過型 TN 液晶パネル (カラーフィルター方式) MIM アクティブマトリックス駆動

15 万画素(縦 238\*横 634)

- ・ガルバノメータスキャナー  
M-G330 ジェネラルスキャンニング社製
- ・スキャナドライバ  
A-102 ジェネラルスキャンニング社製  
入力レンジ：±1Vdc



Fig.D.1 The experimental setup

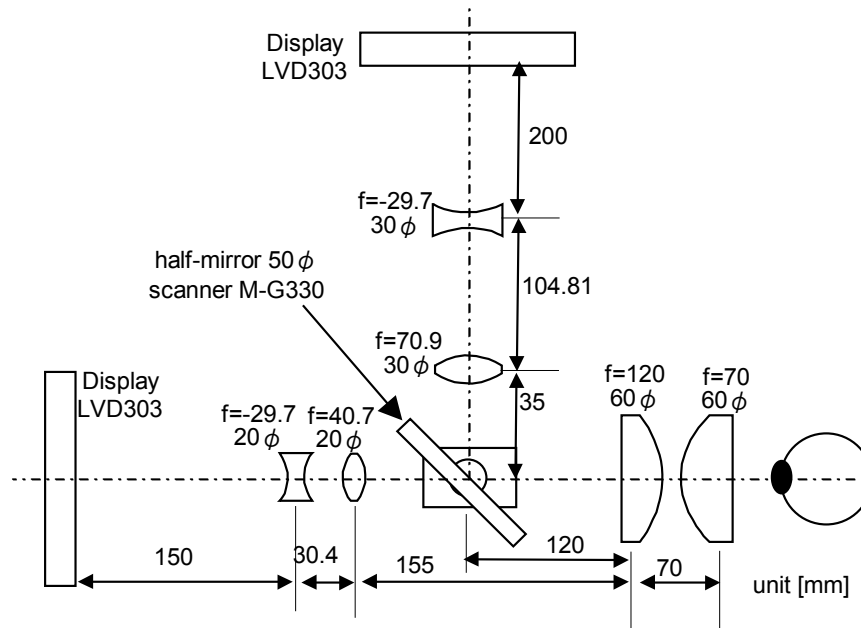


Fig.D.2 Design of image display system (Top view)

出力電流：±1A  
 ゲイン：1A/V  
 周波数レスポンス：dc to 20kHz  
 ステップレスポンス：0.1 A/秒

## D.2 5章で試作した試作システムの仕様

### D.2.1 提示システムの概要

システムの外観図を Fig.D.3 に、概略寸法と配置図を Fig.D.4 に示す。

- ・広視野映像の視野角：対角で約 44 度
  - ・高解像度映像の視野角：対角で約 8 度
- ただし高解像度映像の視野角は、光学システムのレンズ焦点距離や配置位置を変えることにより変更できる。
- ・広視野および高解像度映像の解像度：解像度 768 × 492

### D.2.2 提示システムの主な使用デバイス

- ・ディスプレイ：
  - EVF-UNIT(三菱電機社製)
  - CRT 標準画面サイズ 8.0\*10.7mm
  - 解像度 768\*492



Fig.D.3 Image display system

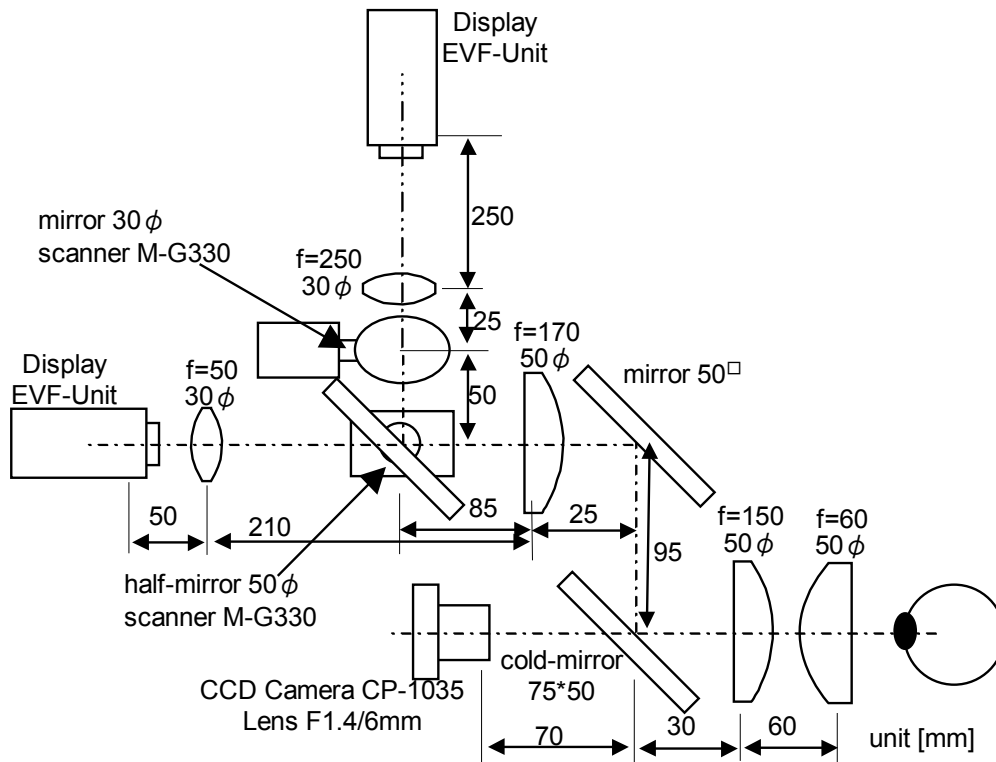


Fig.D.4 Design of image display system for right eye (Top view)



- ・ガルバノメータスキャナー  
M-G330 ジェネラルスキャンニング社製

- ・スキャナドライバ  
A-102 ジェネラルスキャンニング社製  
入力レンジ：±1Vdc  
出力電流：±1A  
ゲイン：1A/V  
周波数レスポンス：dc to 20kHz  
ステップレスポンス：0.1 A/秒

### D.2.3 撮像システムの概要

システムの外觀図を Fig.D.5 に、概略寸法と配置図を Fig.D.6 に示す。

- ・広視野映像の視野角：対角で約 44 度
- ・高解像度映像の視野角：対角で約 8 度

ただし画角は CCD カメラの機能により画角（水平）約 44.3 度～5.8 度，（垂直）34.9 度～4.4 度の範囲で変更可能

### D.2.4 撮像システムの主な使用デバイス

- ・広視野および高解像度映像用 CCD カメラ  
EVI-310(ソニー社製)  
1/3 インチ 38 万画素 CCD  
水平解像度 460TV 本以上  
8 倍ズーム，オートフォーカス付き  
画角（水平）約 44.3 度～5.8 度  
（垂直）34.9 度～4.4 度  
最低被写体照度 6 lux  
外形寸法(W/H/D)49\*51\*100mm



Fig.D.5 Image capture system

- ・ガルバノメータスキャナー  
M-G330 ジェネラルスキャンニング社製

- ・スキャナドライバ  
A-102 ジェネラルスキャンニング社製  
入力レンジ：±1Vdc  
出力電流：±1A  
ゲイン：1A/V  
周波数レスポンス：dc to 20kHz  
ステップレスポンス：0.1 A/秒

- ・視線検出用 CCD カメラ  
CP-1035（千代田常盤商行）  
撮像素子：1/3 インチ 25 万画素  
水平解像度：420 本  
最低照度：0.02 lux  
電源：DC12V 120mA  
寸法：35\*35mm  
レンズ F1.4 / 6mm

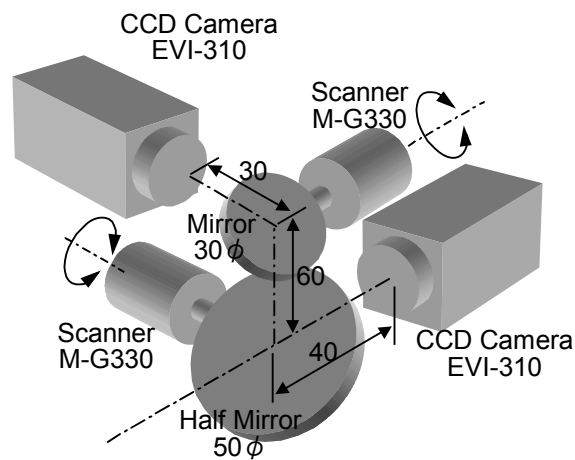


Fig.D.6 Design of image capture system for right eye