

〔非公開〕

T R - M - 0 0 1 1

複数観察者が同時に異なる画像を観察可能な  
視点追従型レンディキュラー立体表示装置

大 村 克 之  
Katsuyuki OMURA

志 和 新 一  
Shinichi SHIWA

宮 里 勉  
Tsutomu MIYASATO

1 9 9 6 . 9 . 3 0

A T R 知能映像通信研究所

# 複数観察者が同時に異なる画像を観察可能な 視点追従型レンチキュラー立体表示装置

大村 克之, 志和 新一, 宮里 勉

ATR 知能映像通信研究所

## **Lenticular Autostereoscopic Display System: Multiple Images for Multiple Viewers**

Katsuyuki OMURA, Sinichi SHIWA, Tsutomu MIYASATO

ATR Media Integration and Communications Research Laboratories

### アブストラクト

100 inch 大画面の視点追従型レンチキュラー立体表示装置を提案した。提案したシステムでは複数の観察者がそれぞれ独立に、各々の運動視差に応じた異なる画像を観察することが可能となる。従来、制限されていた立体視可能範囲は、赤外線照明によるステレオ画像計測で観察者頭部位置を検出し、それに応じてプロジェクタを移動することで拡大することができる。本報告では、はじめにシステムの原理を述べ、試作したシステムのスクリーンパラメータ設計およびシステム構成について述べた。また試作システムのプロジェクタ開口絞りと立体視可能範囲、クロストークとの関係について調べプロジェクタの好ましい投影条件を明らかにし、提案した方式で良好に画像が観察できることを確認した。さらに本システムで提案した視点追従機構の追従特性について述べ、本方式の追従性能を明らかにした。

### Abstract

This paper propose a 100-inch lenticular autostereoscopic display system. In this system, multiple viewers can simultaneously observe their own images on the same screen at the same time with motion parallax according to their eye positions. Viewable areas of this system are extended by introducing eye position tracking that uses an infrared illuminated stereo measurement method. In this paper, principle of the proposed system are explained and design procedure of the lenticular screen for multiple viewers considering the spatial resolution, the side robe width, thickness of the substrate of the screen which is concerning to the focal length, are discussed. Then experimental prototype of the proposed system were shown. Finally, the width of the viewable area and the cross talk between images for the left eye and the right eye are evaluated and the head position tracking performance are estimated.

## 1. はじめに

我々はVRの通信への応用として、遠隔地にいる人間があたかも対面しているかのような感覚でコミュニケーションできる会議システムの研究を進めている[1]。これらシステムの中で視覚を対象とした要素技術では高精細、高視野に加えて立体的表示の実現が望まれている。立体表示は立体映画やゲーム機器等のアミューズメント機器をはじめ、シミュレーター機器、医療分野、CAD等のエンジニアリング分野などで広く使われている。特にバーチャルリアリティ応用研究においては重要なマンマシンインタフェースとして位置づけられ、活発な研究が行われている。

このようなVRを応用した会議システムでは、高い臨場感を得るために以下にあげる条件を満たす立体表示システムが望まれている。第一に対面する人物像を実サイズで表示できる大画面であることがあげられる。第二にフルカラー映像を表示できること、第三として少なくとも現在のテレビジョン(NTSC)相当の動画像を表示できることが望まれている。

表1. に代表的な立体表示方法と特徴を示す。立体表示方法として大別して、特殊なめがねをかけて映像を観察する方法と裸眼で映像を観察する2通りの方式に分けられる。めがねをかける方式として、時分割方式 [2]、偏光めがね方式[3]などがあげられ、様々な分野で実用化されている。これらは映像をスクリーンに投影する構成が可能のため大画面化が容易である。また画像のデータ形式としては通常の2次元画像信号を用いることができるため、実用的なシステムの構成が容易である。しかしこのような会議システムなどの応用では、相手に自然な表情を伝えるために、顔を覆うような特殊な眼鏡を必要としない裸眼立体表示装置が強く要求される。

裸眼立体視可能な立体表示方式として、ホログラフィ方式は位相情報を含めた忠実な波面再生が可能であることがよく知られており、立体を表示する場合には理想的である。近年、動画ホログラフィの研究も盛んになりいくつかの方式が報告されている[4][5]。しかし現在利用できるデバイスが限られ、大画面、フルカラー動画像が表示可能となるには、デバイスおよびホログラム生成技術のブレークスルーが必要であり、まだ将来の技術であると考えられる。

またスクリーン面や光学虚像を機械的に走査、振動させ奥行きに応じた画像を重ねて表示することで立体を表示する、ポリウムスキャン方式が多く提案されている[6][7]。しかしこれらは機械的に空間を走査するため構造が複雑となり、特に大画面の表示はシステム化が難しい。また奥行きに応じた画像を数多く持つ必要があり、通常の2次元画像とのデータ互換性の問題がある。さらに空間走査領域から飛び出して表示することができないため、観察者が立体を掴んだり、画像シーンの中に入り込むといった表現には工夫が必要である。

ホログラフィ方式やポリウムスキャン方式に比べて、両眼視差を用いる裸眼立体表示方式では、2次元画像と同様もしくは一部加工した画像を利用できるため実用的な立体表示システムとして有望であると考えられる。これらの方式として、パララックスバリア方式、バックライト分割方式、レンチキュラー方式などがあげられる。パララックスバリア方式は近年、微細加工技術によって液晶ディスプレイパネル上にバリアを配置することにより、実用的なものが発表されている[8][9]。しかしその製造プロセス上、大画面ディスプレイを構築することは困難である。またバックライト分割方式もディスプレイ画面サイズと同程度の口径のレンズが必要になるため、大画面化は制約を受ける。レンチキュラー方式では投影機を用いて画像を大画面のスクリーン投影することで、他の方式に比べて大画面の表示装置の実現が容易である。

ところがこれらの立体表示法では立体視可能な視点位置が空間に局在するため、観察者が自由に移動することができないという問題がある。これを解決するために、多眼型[10] [11]、頭部追跡型[12]、等が提案されている。しかし多眼型では多視点画像を必要とすること、多重化する視点数に限りがあること、さらに視点が移動するときに画像の不連続が発生することなど、スムーズな立体画像を生成

するには問題があった。また頭部追跡型ではレンチキュラスクリーンと液晶ディスプレイパネルを用い視点位置に応じて左右画像を逆転させる方式、観察者自身の赤外線照明像をバックライトとして用いたバックライト分割方式などが提案されている[13]。しかし前者では左右画像が切り替わるときに多眼型同様、不連続が発生する。また液晶ディスプレイパネルを直視するため、大画面化が困難である。さらにこれらはいずれも画面に対して横方向への視域の拡大であり、観察者は画面に対して前後には動くことはできない。我々は75インチの大画面で、投影された画像の横倍率と投影位置を観察者の視点位置に合わせて制御することにより、観察者が前後左右に移動可能なレンチキュラーめがね無し立体表示装置を既に提案した[14][15][16][17]。このシステムではシングルレンチキュラスクリーンとHDTV-LCDプロジェクターを用いていたため、スクリーン上のレンチキュラーレンズ位置にHDTV-LCDの画素を全面にわたり正確に投影する必要があり、低収差の特殊な投影レンズとプロジェクターの機械位置精度が要求された。また裸眼立体視可能なシステムでありながら、頭部位置を検出するために、観察者は頭部に磁気センサを装着する必要があった。さらにこのシステムでは、周期的に発生する立体視可能な位置で複数人が立体画像を観察することができたが、1人の観察者の視点移動に画像が追従することによって、他の観察者が観察する画像が影響されるため、実質的に1人の観察者にしか対応できない。

そこで我々は100インチダブルレンチキュラスクリーン、マルチプロジェクターおよび赤外線照明ステレオ画像計測による頭部位置検出機構を導入することによって、器具をいっさい装着せずに任意の位置で立体画像を観察でき、しかも複数の観察者が同時に独立に異なる画像を観察できる、大画面裸眼立体視ディスプレイを提案する[18][19]。本報告では、はじめにシステムの原理を述べ、試作したシステムのスクリーンパラメータ設計およびシステム構成について述べる。また試作システムのプロジェクタ開口絞りと立体視可能範囲、クロストークとの関係について調べプロジェクタの好ましい投影条件を明らかにし、提案した方式の原理確認をする。さらに本システムで提案した視点追従機構の追従特性について述べ、本方式の追従性能を明らかにする。

## 2. システムの原理と概要

高い臨場感を実現するために、100インチの大型ダブルレンチキュラスクリーン（以下DLS）とNTSC/CRTプロジェクターによる裸眼立体視ディスプレイを構成した。図1. に表示装置の原理を示す。DLSは拡散層と、それを挟む2枚のレンチキュラーレンズから構成される。DLSをはさんで一方の側にある光源から発せられた光束は、スクリーンに対して対称な他方の位置に幾何光学的に集光する性質を持つ。よって背面からDLSにプロジェクターで画像を投影した場合、画像はDLSの拡散層に投影され、DLSに対して対称な位置にプロジェクタから発した光束が集光される。プロジェクタ2台を一对として両眼間隔で配置した場合には、光束が両眼間隔で集光する。この位置に観察者の両眼を置くことによって、各々の目は各々のプロジェクタからDLSに投影された画像を観察することができる。このとき両眼間隔に相当する視差を持った画像を各々のプロジェクタで投影することにより、観察者は何も装着せずに立体画像を観察することができる。

固定した投影系では画像観察可能位置がプロジェクタ位置により制限され、立体視可能領域が局在する。本システムでは図2. に示すように、観察者が移動した場合でも、観察者の頭部位置を計測しそれに追従してプロジェクタ対を移動制御することにより、局在した立体視可能領域の拡大を行う。

また局在する立体視可能領域はプロジェクタ対の位置、すなわち観察者位置に一对一に対応する。このため複数のプロジェクタ対を設置することにより、複数の観察者が独立に異なる立体画像を観察可能な系を構成することができる。図1は4名の観察者がそれぞれ異なる画像を同一のスクリーンで観察する場合を想定している。これは例えば隣りあった観察者に、同じシーンでありながらそれぞれの運動視差に対応した画像を表示するなどの応用が考えられ、リアリティの高い仮想環境を提供することが可能となる。

### 3. システム構成

画像観察位置はプロジェクタ対と対称な位置（メインローブ）だけではなく、横方向に等間隔で複数存在する（サイドローブ）。これはレンティキュラスクリーンの周期性によるものである。メインローブと隣り合うサイドローブとの間隔（以下、サイドローブ間隔）は特に重要である。前回試作した装置ではサイドローブ間隔を両眼間隔の2倍に設定し、左右眼の画像観察位置が交互に現れるようにした。しかし複数の観察者が各々の画像を独立に観察するためには、サイドローブ間隔を大きくするのが理想的である。サイドローブ間隔が小さい場合、ある観察者に対するサイドローブが他の観察者に対するメインローブと重なり、干渉してしまうからである。しかしサイドローブ間隔は画像解像度、左右画像のクロストークなどとトレードオフの関係にあるため、スクリーンパラメータの実用的な設計が重要である。

今回報告する試作システムでは、原理確認のため1対の移動制御可能なプロジェクター対と、1対の横方向のみ手動で移動可能なプロジェクタ対を設置した。図3. にスクリーンの全景を示す。以下、本章では試作したシステムについて、レンティキュラスクリーン、画像投影系、頭部追従機構、頭部位置検出について順に説明する。

#### 3.1 レンティキュラスクリーン

2人の観察者が70インチ相当の映像を同時に観察できることを考慮し、100インチサイズのスクリーン設計を行った。図4. にスクリーンパラメータを示す。レンティキュラスクリーンの設計パラメータとして、レンズピッチ $p$ 、焦点距離 $f$ 、観察距離 $v$ 、サイドローブ間隔 $s$ 、があげられる。以下にパラメータ設計の手順を示す。

はじめにレンズピッチについて考える。レンズピッチは映像の水平解像度を制限する。本システムでは70inchの投影画像に対し、水平解像度480pixels/line（NTSC相当）を確保するように設計した。70inchの画面上では画素サイズは2.98mm/pixelとなる。従ってこの解像度を維持するために、サンプリング定理を考慮すると1.49mm以下のレンズピッチが必要である。今回の試作では成形金型を考慮してレンズピッチ $p=1.2\text{mm}$ とした。

次に焦点距離の設計について述べる。焦点距離 $f$ はスクリーンを形成する材質の光学的厚みでほぼ決定する。今回はアクリル素材を用いて100inchの大型スクリーンを構成する。本システムではDLSを構成するため、表裏のスクリーンをレンズ単位で正確に張り合わせる必要がある。また変形などが生じた場合、スクリーン表裏の機械的、光学的対称性が低下するためモアレが発生し、画像観察が困難となることが懸念される。薄い素材を用いた場合、このような正確な張り合わせと変形を抑えることは困難である。これらを考慮し、ここでは5mmの厚さのスクリーンを表裏2枚張り合わせてDLSを構成する。アクリルの比屈折率1.49を考慮すると5mmの素材では焦点距離 $f=3.36\text{mm}$ となる。

次にサイドローブ間隔について述べる。例えば2つのプロジェクター対を設置し2人で映像を観察する場合、一方のプロジェクター対のメインローブが他方のプロジェクター対のサイドローブと重なる場合、他方の観察者の画像が一方の観察者の画像に重なって観察される。このときサイドローブ間隔 $s$ を大きくして、2人の観察者が少なくとも互いのサイドローブの内側に配置できるようにすることで、一方の観察者の観察画像に他方の観察者のサイドローブが干渉する確率を低くすることができる。サイドローブ間隔 $s$ はレンズピッチ $p$ 、焦点距離 $f$ および観察距離 $v$ の関数として以下の式で決定される。

$$s = p \frac{(f + v)}{f} \quad (\text{eq. 1})$$

図5. に、 $f$ と $s$ の関係いくつかのレンズピッチ $p(\text{mm})$ に対して、視距離1.6mを例に示す。サイドロー

ブ間隔を拡げるためにはレンズ焦点距離 $f$ を短くするか、レンズピッチを大きくする必要がある。しかし焦点距離 $f$ が短い場合レンズ曲率が小さくなり、収差の影響が大きくなる。さらに既に述べた機械的強度が減少する問題がある。スクリーン厚みによる焦点距離の制限と、画像解像度によるレンズピッチの制限を考慮し、焦点距離 $f=3.36\text{mm}$ とした。この時の観察位置 $1.6\text{m}$ でのサイドローブ間隔は約 $60\text{cm}$ であり2人の観察者が並んで画像を観察できる距離を確保できることがわかる。以上からスクリーン仕様を表2.のとうりとした。

### 3.2 画像投影系

プロジェクターは左右それぞれの画像を投影する2台のプロジェクター1対から構成される。プロジェクター対を図6.に示す。2台のプロジェクター開口部間隔 $d$ はハーフミラーを用いることによって成人の平均的な両眼間隔である $65\text{mm}$ に固定されている。DLSの対称性により、2台のプロジェクター出射光はスクリーンに対して対称な位置（観察位置）に両眼間隔 $d$ で集光される。

フルカラーのプロジェクタとしては液晶パネル式、CRT式が広く使われている。またカラー画像を投影するためにR,G,B各々の画像を3眼で投影し、スクリーン上で重ね合わせる方式や、ダイクロイックプリズムで光路を合成して1眼で投影する方式がある。ダブルレンティキュラー方式では光源位置が、直接的に観察位置に反映される。従って、フルカラー画像を観察する場合、観察位置でR,G,B各々の画像が混色するためには投影光源の光路が完全に一致する必要がある。さらに高輝度な投影系を構成しやすいことから、本システムではCRT光源の1眼式プロジェクタを用いた。

また観察位置において、左右2つの光源から発した光束は両眼間隔で集光し、各々の集光スポットの大きさは両眼にオーバーラップしない大きさでなければならない。投影光源の見かけの大きさを最適に調節するために、プロジェクタ開口に幅を $35\text{mm}$ から $65\text{mm}$ まで可変できる開口絞りを挿入した。開口絞りを挿入した開口部を図7.に示す。

### 3.3 頭部追従機構

図8.に視点追従機構および図9.制御系構成図を示す。機械制御系は1つのプロジェクター対に対して2軸のリニアモーター駆動系から構成されている。リニアモーターを設置したガイドレールを直交させ、その上をプロジェクター対が移動する。プロジェクター対は2軸に移動するので、観察者は前後および左右に移動することが可能となる。移動レンジは前後および左右に $1300\text{mm}$ および $900\text{mm}$ 、移動位置精度は $0.1\text{mm}$ である。プロジェクタ位置制御はMOTOLORA68000ボード上のVxWorksOS下で行われる。

画像は観察者の視点位置に対応して運動視差を持つCG画像としてSGIグラフィックワークステーションにより $640\times 512$ のフルカラー画像として生成され、フレームスキャンコンバーターによりNTSC画像に変換され、CRTプロジェクターによって $100\text{inch}$ のDLSに投影される。

### 3.4 頭部位置検出

#### 3.4.1. 方法

プロジェクタ対を観察者の横方向および前後奥行き方向の移動に合わせて移動制御を行うために、観察者頭部の3次元位置座標を取得する必要がある。しかも観察者の自由な動きを拘束しないために非接触計測が望まれる。非接触の3次元座標センサとして、VR応用では磁気センサが広く使われ、例えばKaiser Aerospace and Electronics社のPolhemus Sensorが有名である[20]。過去に我々が試作したシステムでは、頭部位置を磁気センサ(Polhemus: Fastrack)によって計測していた。しかしこの方式では周囲に磁性体がある場合に計測精度が落ちる問題がある。またセンサ自身は小型であるが、これを頭部に設置するために観察者はヘッドバンドを装着する必要がある。さらに信号ケーブルが接続されていたため観察者に不快感を与え、裸眼立体視の快適性が十分活かされていなかった。

一方カメラで計測対象を撮影し画像処理的手法で立体計測を行う方法が知られている。特に2台のカメラを用いたステレオ計測法が多く研究されているが、この方法では対応点問題の解決が大きな課題となり測定対象の条件に拘束が多い。ただし特定点のポイント計測に限れば、マーカーを測定対象に付けることにより対応点問題は回避できる。マーカーを用いる方法ではカラーマーカーを測定対象に装着して、カラー画像処理によりマーカーを抽出して3次元座標を求めるシステムが開発されている[21]。しかしこれは対象に対して適当な可視光照明が必要であり、投影型のディスプレイを観察するための妨げとなる。またLED等の自己発光するマーカーを用いる方法[22]が実用化されているが、電源供給が必要であり測定対象である観察者への負担が大きい。

また視線検出への応用として、赤外線照射による瞳孔反射像を検出する方法が報告されている[23]。しかし瞳孔反射像強度は照明光の瞳への入射角度に強く依存するので好ましくない。そこで本システムでは、観察者が機器を装着する必要がない画像処理的手法として、2台の撮影カメラと近赤外線照明によるステレオ画像計測法を用いた。ステレオ画像の対応点問題は、赤外線に対して強い反射拡散特性を持つシールを観察者の顔に貼ることで回避した。さらに室内照明の影響を低減するために、撮影カメラレンズにも近赤外線透過フィルタを設置した。これにより撮影画像中のマーカーは室内照明の影響を受けずに高いコントラストを保つことができ、単純2値化によってマーカーを切り出すことが可能となる。

#### 3.4.2. ハードウェア構成

ステレオ計測用カメラは近赤外線照明光源とともにスクリーン下部に設置した。撮影カメラを図10.に示す。カメラレンズ16mm-1.6fを用い左右カメラレンズ主点間隔411mmで設置した。照明は25Wのメタルハライドランプを光源とし近赤外線透過フィルタを開口部に取付け使用した。

ステレオ画像計測のための画像処理および演算部分はSPARC Station (Sun) および、これとVMEbusにより接続された画像処理ハードウェアITI-150(Imaging Technology)から構成される。撮像された2枚の画像は並行して512×512×8bitのモノクロ画像としてITI-150上のフレームバッファに取り込まれ2値化、孤立点除去、重心計算までがITI150によりビデオレートでリアルタイム処理される。Sparc Station上で求められたマーカー重心位置からマーカーの3次元座標が計算され、投影光学系にフィードバックされる。これにより観察者の視点位置が移動しても視点位置に正しく左右の画像が投影される。

#### 3.4.3. マーカー空間位置座標計算

図11.にマーカー位置座標計算のフローを示す。赤外線画像中のマーカーによる輝点の重心位置はパイプライン構成のハードウェアにより、カメラ1台あたり1/30secのフレームレートで計算される。実際にはステレオ計測を行う2台のカメラを用いるため計測サイクルは2/30secとなる。入力画像は一定のしきい値で単純2値化され、孤立点除去、ラベリング等の幾何学的な前処理の後、マーカー位置の重心が計算される。ところで単純2値化ではしきい値を越えるマーカー以外の輝点が画像中に現れた場合、これも対象物体として計測する。観察者が装着する眼鏡や装飾品などからの反射光は、ある条件下ではマーカーからの反射拡散光と同レベルの輝点となって観察されノイズとなる。この影響を軽減するために、本システムでは、入力画像2値化および孤立点除去後、注目する矩形領域AOI(Area of Interest)に対してのみラベリングを行い重心が計算される。AOIサイズはマーカーが1計測サイクル(2/30 sec)内で移動し得る領域を内包する、できるだけ小さいサイズとするのが適切である。AOIは1計測サイクル過去のマーカー重心位置を中心とする矩形領域として定義される。撮影画像中にノイズとなる高輝度の輝点が存在する場合、システム起動時にマーカー輝点の位置初期値をマウスによりオペレーターがシステムに与える。

2台のカメラ画像上でのマーカー位置から、マーカー空間位置座標を計算する。本システムでは、カメラ撮像面上のマーカー位置と撮影レンズ主点を通る空間上の直線を2台のカメラそれぞれに対して

求め、その直線の交点座標をマーカー空間位置座標とする方法をもちいた。

#### 4. システムの諸特性

##### 4.1 複数人観察画像

図12. に2人の観察者が同時に異なる画像を観察する場合の表示例を示す。2対のプロジェクターを観察者1,2に相当する位置に移動し、異なる画像を同時に投影した。写真(A),(B)はそれぞれ2人の観察者位置に相当するカメラ(a),(b)によって撮影されたものである。この条件では2人の観察者に相当するカメラ(a),(b)の間隔は観察距離1.6mでのサイドローブ間隔 $s:570\text{mm}$ より小さく設定してあるため互いの画像が干渉することは無く、異なる画像が同時に独立に観察されていることが確認できる。

##### 4.2 開口幅の最適化実験

スクリーンに対して横方向の立体視可能範囲はプロジェクタ光源の見かけの大きさに大きく影響される。プロジェクタ位置が常に観察者の両眼と対称な位置に正しく配置された場合、開口は少なくとも両眼の開口程度の大きさがあれば十分であると考えられる。しかし本システムでは、プロジェクタの開口間隔を標準的な成人の両眼間隔である65mmに固定したことによる観察者の両眼間隔の個人差による誤差、さらに観察者が移動した場合のプロジェクタ位置制御の誤差、が発生することが考えられる。開口幅を上げた場合、観察位置での集光束は広くなり立体視可能領域は広くなる。従って両眼とプロジェクタとの相対位置誤差による影響を少なく抑えることができる。一方で、集光束の幅が拡がり左右の画像が重なって見えるクロストークが増大することが懸念される。そこで開口幅の変化に対する横方向立体視可能領域の変化、およびクロストークの変化の測定を行い、開口幅の立体画像への影響を調べた。

###### 4.2.1. 横方向立体視可能領域の測定

スクリーンに投影された人物像と対面する自然な距離として、スクリーンから1.6mの観察位置を試行的に設定した。画面にはCGによって生成された実物大の人物を表示した。このとき開口幅を35mm, 50mm, 65mmと変化させ立体視可能領域の幅を測定した。測定は観察者による目視で行った。観察者には頭部に視点座標測定用の磁気センサを装着し、立体画像が良好に見える範囲で左右に動くように指示し、モニタされた頭部座標から立体視可能範囲を測定した。図13. に開口絞り幅に対する立体視可能領域の変化を示す。開口絞りが大きくなるにつれて比例的に立体視可能領域は大きくなっていることがわかる。両眼間隔65mmで並べることができる最大開口絞り65mmでは約12mm、最小絞り35mmでは約7mmの立体視可能領域が確認された。

###### 4.2.2. クロストークの測定

開口絞りに対するクロストークを、観察位置での光束の分布により測定した。図14. に開口しほり35mmでの観察位置での光束の照度分布を示す。横軸は横方向観察位置座標、縦軸は照度をその最大ピーク値で規格化した相対照度である。実線は左右のうち一方にホワイト信号、一方にブラック信号を入れて交互に測定した場合、破線は両方にホワイト信号を入れた場合を示す。クロストークは輝度コントラスト比、すなわち両方にホワイト信号を入れた場合のピーク値(max)と中央部の極小値(min)から $(\text{max}-\text{min})/(\text{max}+\text{min})\times 100\%$ とする定義がよく用いられる。しかしここでは左右の一方にのみホワイト信号を入れたときの、対応する眼球位置での光束と、他方にのみホワイト信号を入れたときの、一方の眼球位置に漏れ出す光束(leakage)とのコントラスト比から $(\text{max}-\text{leakage})/(\text{max}+\text{leakage})\times 100(\%)$ のようにクロストークを定義した。コントラスト比が大きいくほど、クロストークが小さいことを示している。図15. に開口絞りに対するコントラスト比を示す。開口絞りが広くなるに従ってコントラスト比が低下しクロストークが増大していることがわかる。



上記の実験により立体視可能領域の広さとクロストークは、プロジェクター開口絞りの大きさに対して、トレードオフの関係にあることが実測値で示された。静的な立体画像特性を向上させるためには、クロストークを低減するために開口絞りを最小の35mmにすることが望ましい。この場合、図12の立体視可能領域の測定結果から、プロジェクタ位置に対する眼球位置誤差は片眼あたり7mm以下に抑える必要がある。一方、開口を最大の65mmにした場合、位置誤差の許容値は片眼あたり12mmとなる。本システムの頭部位置検出誤差は次セクションで述べるとおり1.7mm程度と見積もられ、十分な精度が得られたことから、開口絞りはクロストーク低減に有利な最小絞り35mmとした。

### 4.3 視点検出特性

#### 4.3.1. マーカー反射拡散特性

マーカーとして用いたシールは人体その他一般器具に比べて赤外線に対して強い反射拡散特性を示す。よってマーカー位置は撮像された画像を単純2値化することで容易に切り出すことができる。本報告では3M社の赤外線反射シートを直径約6mmに切断しマーカーとして用いた。図16.(a)に赤外線カメラにより撮影された画像とAOI、(b)に赤外線カメラ画像のマーカー位置((a):白線位置)での輝度プロファイルを示す。縦軸は赤外線カメラの画像輝度(8bit A/D値)、横軸は横方向画素位置である。実線は室内照明を消した状態、破線は室内照明をつけた場合を示す。マーカー位置では、バックグラウンドに比べて十分高い輝度信号が検出されていることがわかる。またバックグラウンドは室内照明の影響をほとんど受けてないことがわかる。図17.に赤外線マーカーの反射方向特性を示す。縦軸は赤外線カメラの画像輝度(8bit A/D値)、横軸はマーカー張り付け面法線とカメラ光軸とのなす角度である。角度が60°まで傾いてもマーカー輝度の減衰は70%程度であり、バックグラウンドに比べて2倍以上の反射強度を保持していることがわかる。これらによりマーカーからの反射拡散強度は室内照明、観察者の顔の向き、に対して十分ロバストであり観察者視点位置移動を計測するために十分有効であると考えられる。

#### 4.3.2. AOIサイズについての検討

AOIサイズLはマーカーを追跡できる最大速度とノイズに対するロバスト性に大きく関係し、前者と後者はトレードオフの関係にある。レンティキュラー方式のディスプレイでは観察者の視点位置は横方向に拘束されるため、視点追従は観察者の横方向の移動に対して行われる必要がある。よってここでは横方向の計測対象の移動に対するAOIサイズLの検討を行った。ここでAOIサイズLとはAOIを表す矩形の測定対象空間上での横方向の長さとする。観察者視点移動の計測サイクルを $t_c(=2/30\text{sec})$ とした場合、時刻Tでのマーカー重心位置は時刻T-tでのマーカー重心位置を中心とする、サイズLの矩形領域(AOI)内で探索される。従って計測サイクル $t_c$ でマーカー位置がL/2以上移動した場合、マーカーの追跡に失敗する。この関係を調べるためにいくつかのAOIサイズで、マーカー追跡に失敗したときの観察者の視点移動速度を実測した。観察者視点移動速度は、頭部に磁気センサを装着し時系列の視点位置データを取得することにより求めた。この結果を図18.に示す。直線は計測サイクル $t_c$ でAOIサイズの1/2の距離を移動する速度(限界速度)である。視点移動速度が限界速度を超えるとトラッキングエラーを起こすことが確認できる。

さらに実用的なAOIサイズを見積もるために、ディスプレイ観察時の観察者の視点移動速度分布の実測を行った。観察者頭部に磁気センサを装着し、自然な状態で実際に立体ディスプレイを観察している状態での視点移動速度分布を測定した。またこの時のAOIサイズは観察者位置で300mm程度と十分大きくし、観察者後方は暗幕で覆いマーカー以外のノイズ(バックグラウンドノイズ)は入らない状態で行った。この結果、視点移動速度は約±380mm/secの範囲に分布することが測定からわかった。図17より380mm/secの視点移動速度に追従するAOIの最小サイズは約50mmであることがわかる。従って、AOIサイズを50mm以上に設定することにより、この視点移動速度範囲で十分トラッキングを行うこと

ができる。また標準的な顔の幅を考えた場合、50mm四方の矩形は顔の領域に内包される。従って50mm四方のAOIは観察者背後のノイズの影響を受けない条件をも満たしていることがわかる。

さらに視点位置の測定精度を評価した。図19.(a),(b)に横方向および前後方向の、マーカー位置に対する測定値を示す。回帰直線からr.m.s.により測定精度を見積もった結果、この視点検出系により横方向で1.7mm、奥行き方向で4.7mmの位置測定精度が得られることを確認した。

#### 4.4 プロジェクタ移動速度の測定

プロジェクタの立ち上がりを含めた視点追従速度を、観察者の横方向の動きを想定して測定した。プロジェクタが静止した状態から、ある位置まで移動し静止するまでの時間を実測し、視点追従速度を求めた。あらかじめ基準位置にプロジェクタを配置し、この位置に対応する観察位置での光束分布のピーク位置（眼球位置）に照度計を固定した。この時の照度を基準照度とし、ある位置から基準位置までプロジェクタを移動したときの、照度計測定値をプロットした。プロジェクタが移動を開始してから、照度計測定値が基準照度になるまでの時間を求めることにより、プロジェクタの移動所要時間を求めた。図20.に測定結果を示す。横軸は基準位置からの距離、縦軸は所要時間である。回帰直線から移動速度は297.0mm/sec、立ち上がり時間は100msec程度であることがわかった。前節で測定した頭部移動速度の標準偏差（ $\sigma = 127.7\text{mm/sec}$ ）を考慮すると、定常的な頭部移動速度ではほぼ追従可能であることがわかる。また最大東部移動速度を $3\sigma = 383.1\text{mm/sec}$ とすると、この速度で立体視可能範囲（7mm：開口絞り35mm）を移動した場合の所要時間は約18msecであり、立ち上がり遅れ時間100msecはこれを越える値となっている。従って頭部の移動を開始した瞬間、追従遅れによりモアレが発生し立体視ができない場合があることが認められる。目視によってもこの現象が観察された。立ち上がり時のモアレの発生は臨場感を損なう原因の一つであり、今後の改善が望まれる。

#### 5. まとめ

100インチダブルレンティキュラスクリーン、マルチプロジェクターおよび赤外線照明ステレオ画像計測による頭部位置検出機構を導入することによって、器具をいっさい装着せずに任意の位置で立体画像を観察でき、しかも複数の観察者が同時に独立に異なる画像を観察できる、大画面裸眼立体視ディスプレイを提案し試作した。

画像解像度、スクリーン厚み、さらに複数観察者が同時に画像を観察する場合に問題になるサイドロープ間隔を考慮したレンティキュラスクリーン設計について述べ、70インチの投影画像に対して水平解像度480pixels/line（NTSC相当）、サイドロープ間隔約570mm、を確保する設計を行い試作した。従来の裸眼立体視ディスプレイでは一人もしくは複数観察者でも同じ画像しか観察することができなかったが、提案したシステムにより2人の観察者が同時に異なる立体画像を観察できることを確認した。

また赤外線照明によるステレオ画像計測によって、観察者の顔にマーカーを張るだけで、その頭部位置座標を計測する系を導入した。導入した測定系により観察者の頭部位置を横方向1.7mm、前後方向4.7mmの精度で測定できることを確認した。これにより観察者頭部位置と対応する位置に常にプロジェクタを正しく移動制御することにより、従来立体視可能領域が限定されていた裸眼立体ディスプレイで、観察者が自由に移動しながら立体画像を観察できることを確認した。

さらに横方向の頭部追従速度特性を実測し、試作したシステムでは297.0mm/secでのプロジェクタ移動が可能であることを確認した。この際の機械駆動系の立ち上がり遅延が100msec程度あることがわかった。観察者が静止している場合の立体視可能範囲を考慮すると、立ち上がりの遅延により画像にモアレや陰が発生することが懸念される。目視でもこの現象が確認されたことから、今後の課題と考える。

本報告で、器具をいっさい装着せずに任意の位置で立体画像を観察でき、しかも2人の観察者が同時に独立に異なる画像を観察できることが原理的に確認された。今回試作したシステムでは観察者

は2名のみであった。さらに観察者の人数を増やす場合、サイドローブ間隔や投影系の機械的な配置の問題など、実用設計上解決すべき課題があり、今後の検討事項としたい。

#### 謝辞

本研究の機会を与えてくださった、ATR知能映像通信研究所、酒井保良会長ならびに中津良平社長に感謝し、結びといたします。

## References

- [1] F. Kishino and K. Yamashita, "Communication with realistic sensations applied to teleconferencing", Technical Report, Vol. IE-89-35, pp. 1-6, IEICE, 1989
- [2] J. A. Roesse and L. E. McCleary, "Stereoscopic Computer Graphics Using PLZT Electro-Optic Ceramics", Proc. SID, 19, 2 (Second Quarter), 1978
- [3] D. L. Symmer, "3-D Cinemas Slowest Revolution", American Cinematographer, 55, 4, pp.406-409, 1974
- [4] P. Hilaire, S. A. Benton, et. al. , "Electronic display system for computational holography", proc. SPIE, 1212, 1990, p.174
- [5] N. Hashimoto and S. Morokawa; "Motion-Picture Holography Using Liquid-Crystal Television Spatial Light Modulators", SID95 Digest, vol. XXVI, pp. 847-850, 1995
- [6] J. Hamasaki, Y. Nagata, and M. Okada, "Real-time Transmission of a 3-D Image Using Volume Scanning and Spatial Modulation", Appl. Opt., Vol. 16, No.6, pp. 1675-1678, 1977
- [7] P. Soltan, J. Trias, W. Dahlke, M. Lasher and M. McDonald, "Laser-Based 3D Volumetric Display System", SID94 Digest, vol. XXV, pp.191-194, 1994
- [8] G. Hamagishi, et. al., "Stereoscopic LC Displays without Special Glasses", SID Digest of Applications Papers, pp.75-78, 1995
- [9] H. Isono, et. al., "Autostereoscopic 3D LCD Display Using LCD-Generated Parallax Barrier", Japan Display '92, pp. 303-306, 1992
- [10] D. Takemori, K. Kanatani, S. Kishimoto, S. Yoshii and H. Kanayama, "3-D Display with Large Double Lenticular Screens", SID 95 Digest, vol. XXVI, pp. 55-58, 1995
- [11] H. Isono and S. Komiyama, "An Autostereoscopic 3-D HDTV Display System with Reality and Presens", SID 96 Digest, pp. 135-138, 1996
- [12] S. Ichinose, N. Tetsutani and M. Ishibashi, "Head tracking stereoscopic display Technique" (in Japanese), IEICE Trans. C-II J73-C-II(3), pp. 218-225, 1990
- [13] Y. Nishida, et. al., "Simplification of infrared illumination of stereoscopic liquid crystal TV", Proc. of SPIE, pp. 96-101, 1995
- [14] N. Nagashima, et. al., "Stereoscopic Display System with Extended Observable Space Employing Eye-Position Tracking" ( in Japanese), IEICE Trans. C-II J75-C-II(11), pp. 719-728, 1992
- [15] N. Tetsutani, et. al., "Stereoscopic display method employing eye-position tracking and HDTV LCD-projector", Proc. International Workshop on HDTV '92, Vol.2, p.60, Institute of Television Engineers of Japan, 1992
- [16] K. Omura, N. Tetsutani and F. Kishino, "Lenticular Stereoscopic Display System with Eye-Position Tracking and without Special Equipment Needs", SID'94 Digest, pp. 187-190, 1994
- [17] N. Tetsutani, K. Omura and F. Kishino, "Wide-screen autostereoscopic display system employing head-position tracking", Opt. Eng., Vol. 33, No. 11, pp.3690-3697, 1994
- [18] N. Tetsutani, K. Omura and F. Kishino, "A Study of a Stereoscopic Display System Employing Eye-Position Tracking for Multi-viewers", Proc. SPIE Vol. 2177, pp. 135-142, 1994
- [19] K. Omura, S. Shiwa and F. Kishino, "Development of Stereoscopic Display System: Multiple Images for Multiple Viewers", SID'95 Digest, Vol. XXVI, pp. 761-764, 1995
- [20] H. F. Murry, "Recent Advances in ac Magnetic Helmet Tracking", SID'95 Digest, vol. XXVI, pp. 655-658, 1995
- [21] Quick MAG System User's Manual, OKK Inc, Tokyo, Japan
- [22] OPTO Track User's Manual, Northern Digital Inc., Ontario, Canada

[23] A. Tomono, "The Design of an Optical System Extracting Pupil Image for Eye Movement Detection" (in Japanese), IEICE Trans. D-II J74-D-II(6), pp. 736-747, 1991

Table 1 Summary of Typical Three Dimensional Display Systems

	type	large screen	full color image	live image	equipmet needs	viewing position	multiple image	image quality
Naked Eye	double lenticular	good	good	good	good	restricted	good	good
	single lenticular	fair	good	good	good	restricted	poor	good
	parallax barrier	poor	good	good	good	restricted	poor	good
	holography	poor	poor	poor	good	free	good	poor
	volume scan	poor	fair	fair	good	free	poor	fair
glasses	time sharing	good	good	good	poor	free	poor	good
	polarized glass	good	good	good	poor	free	poor	good

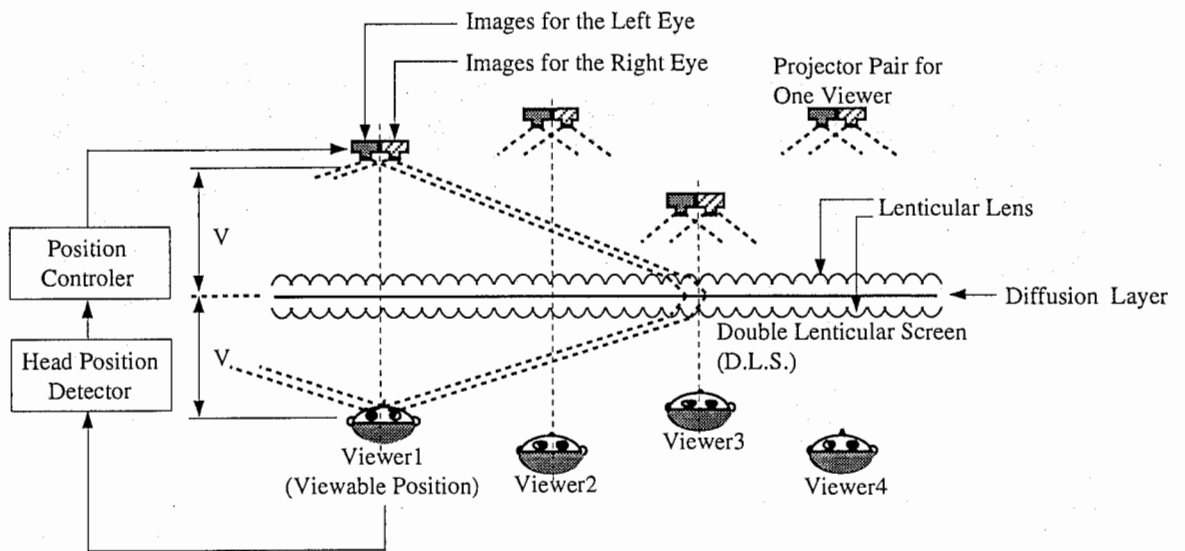


Fig.1 Principle of the System

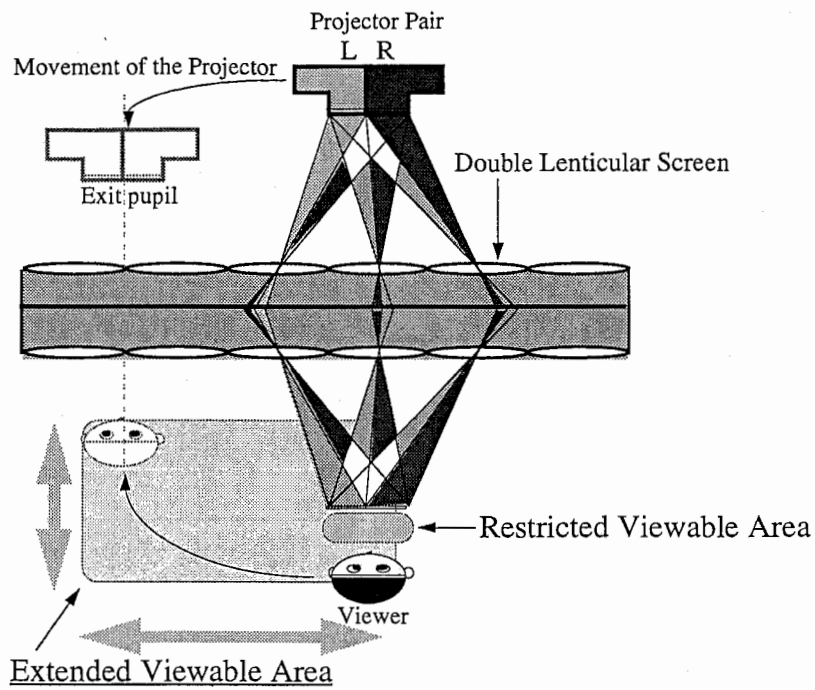


Fig. 2 Conceptual Illustration of Extending the Viewable Area



Fig. 3 Front View of the Proposed Display System

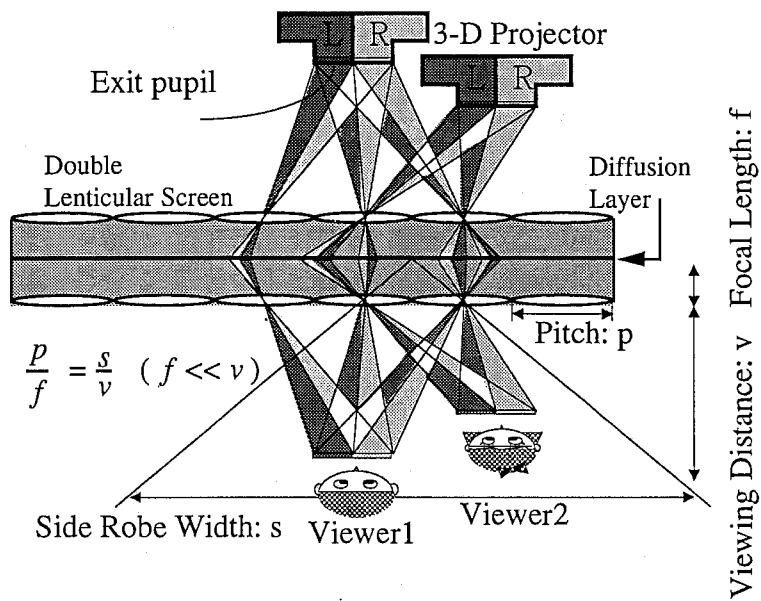


Fig 4 Illustration of the Screen Parameters

Table 4 Screen Parameters

Screen Type	Double Lenticular
Screen Size	100 inch
Screen Pitch	1.2 mm
Focal Length	3.36 mm
Side Robe Width	572.6 mm at 1.6m front



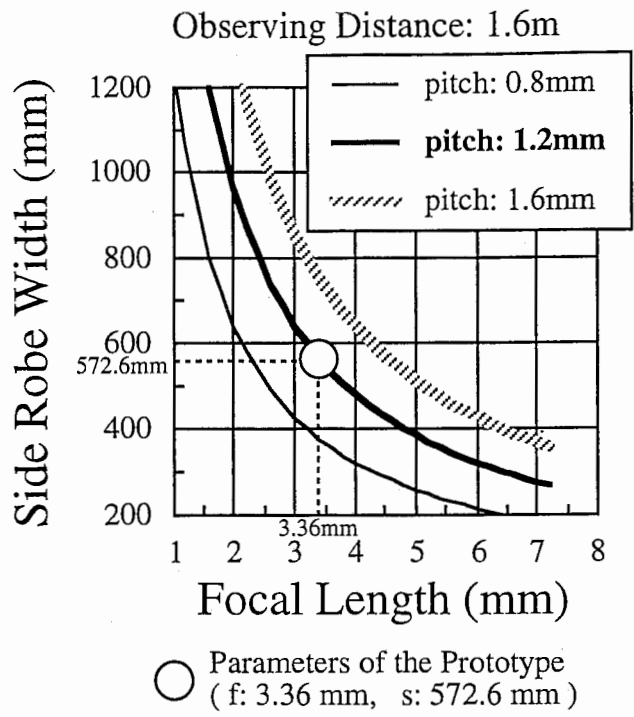


Fig. 5 Relationship between the Side Robe Width and the Focal Length

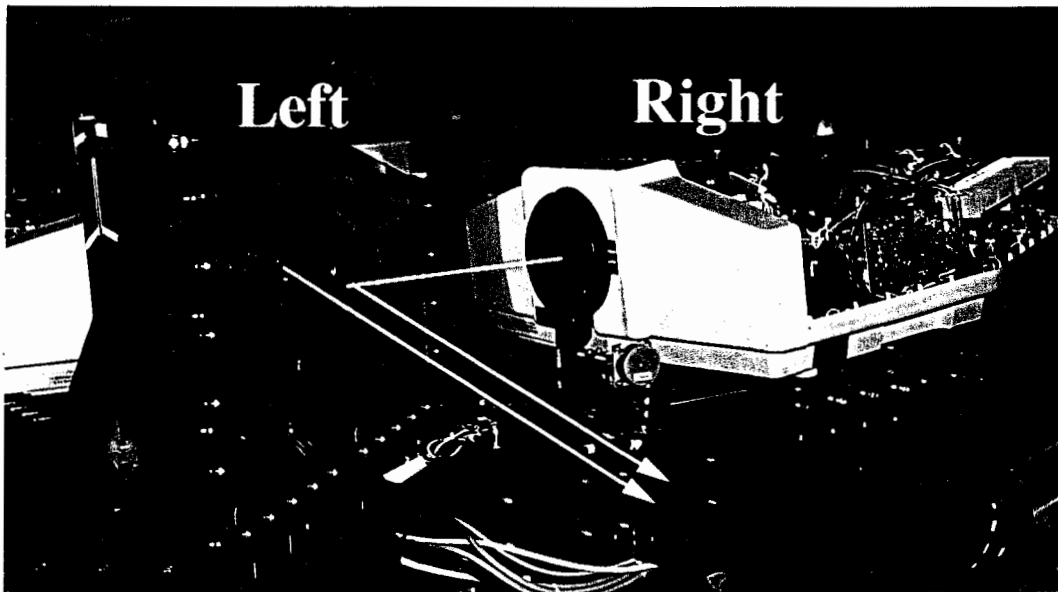


Fig. 6 Projector Pair for One Viewer

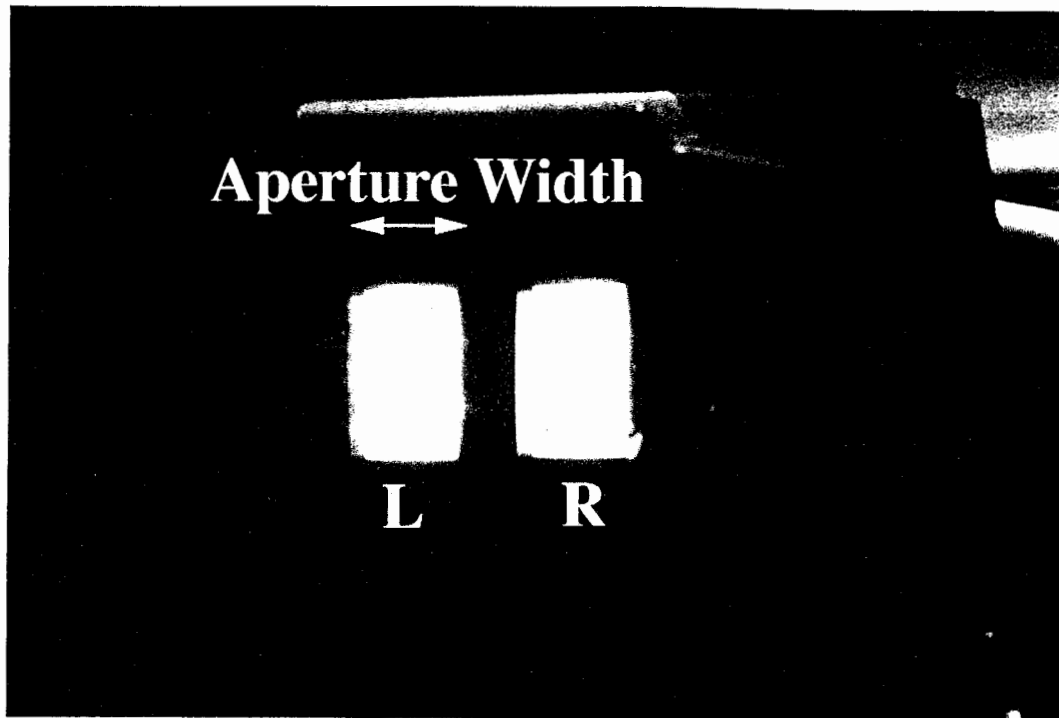


Fig. 7 Rectangular Aperture Stop of the Projector

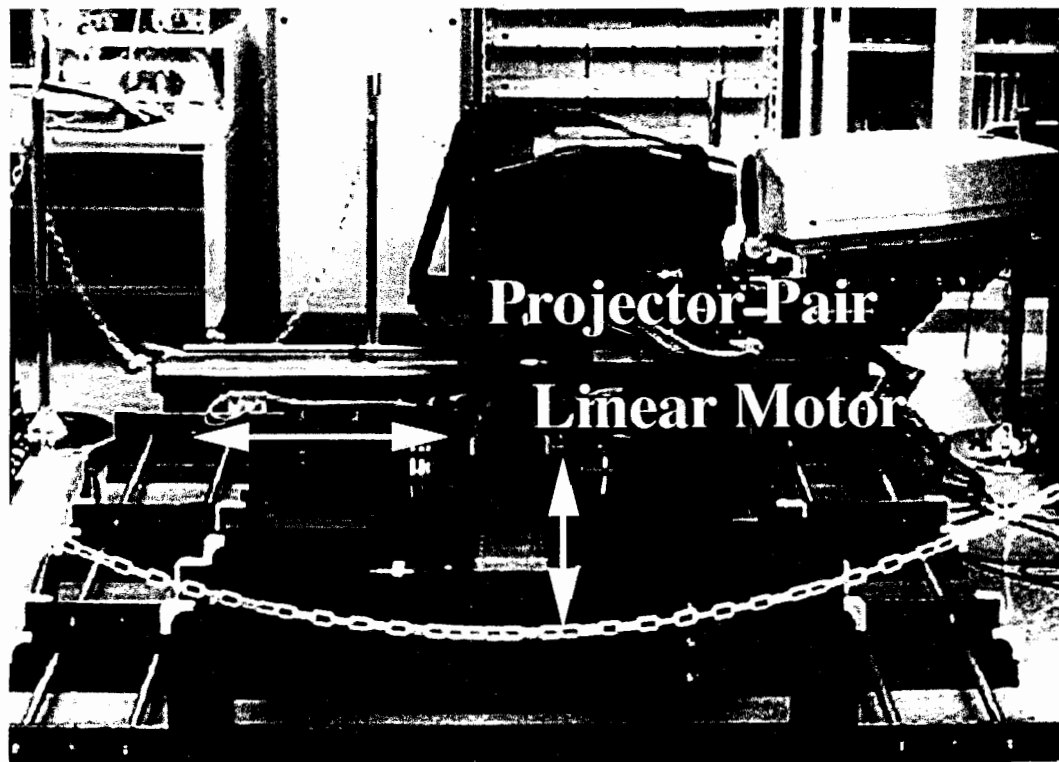


Fig. 8 Mechanics for the Head Position Tracking of Projectors

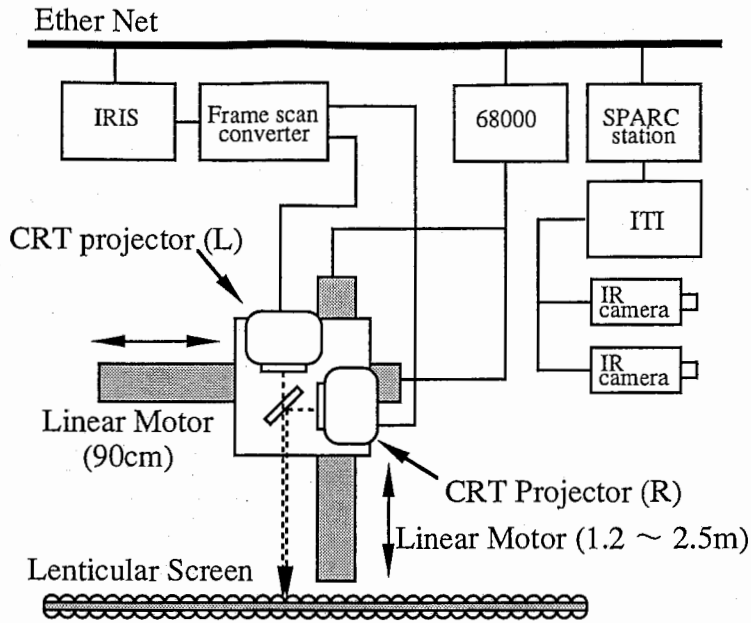


Fig. 9 Block Diagram of the System



Fig. 10 Stereo Measurement Camera at the Bottom of the Screen

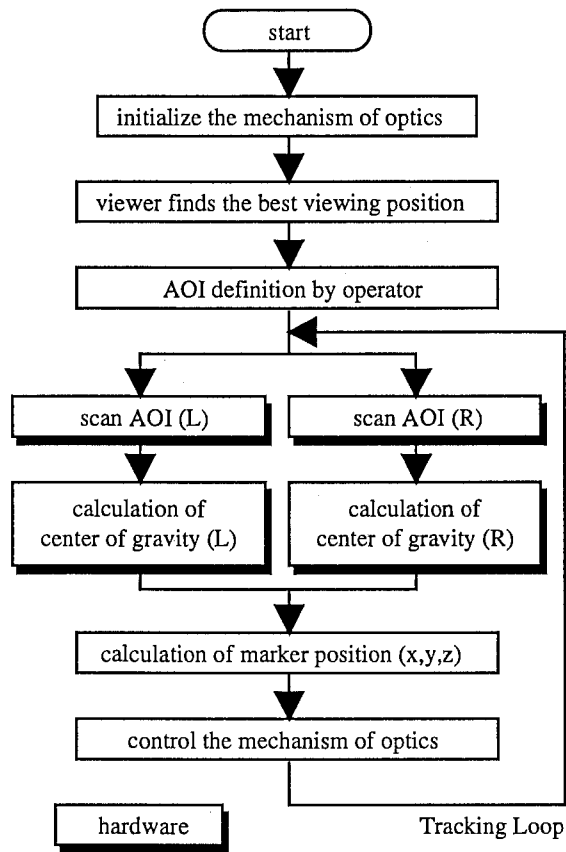


Fig. 11 Control Flow Diagram of the Eye Position Tracking

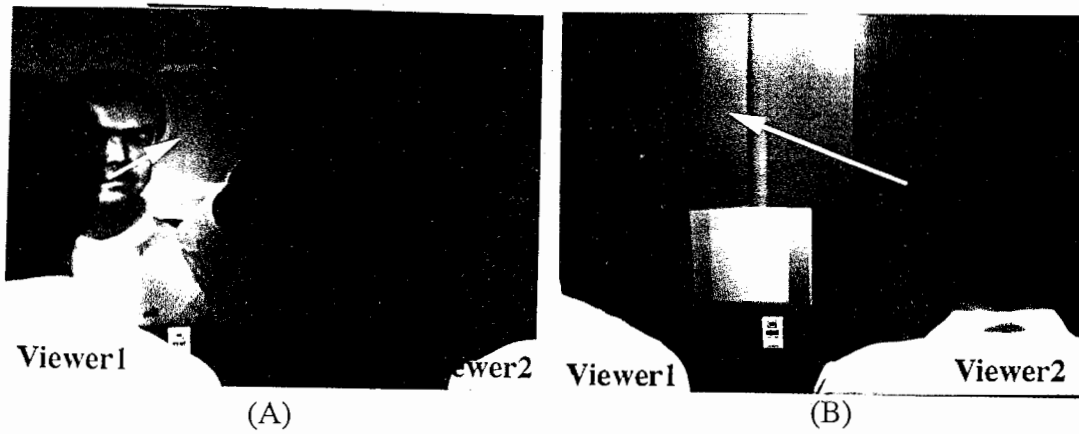
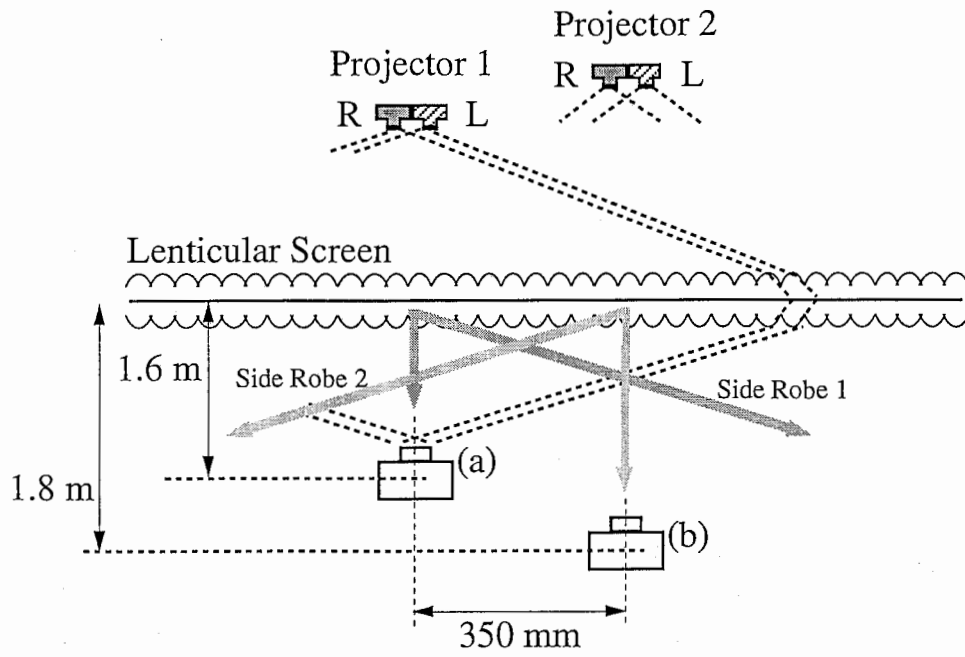


Fig. 12 Different Images for Two Viewers Displayed on the Screen

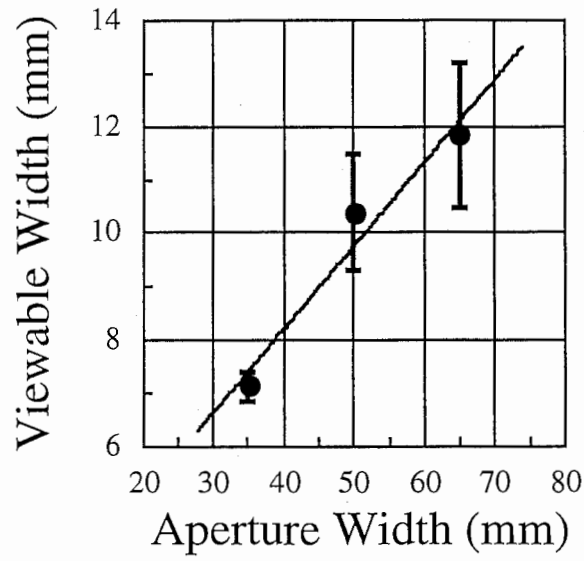


Fig. 13 Lateral Width of a Viewable Area

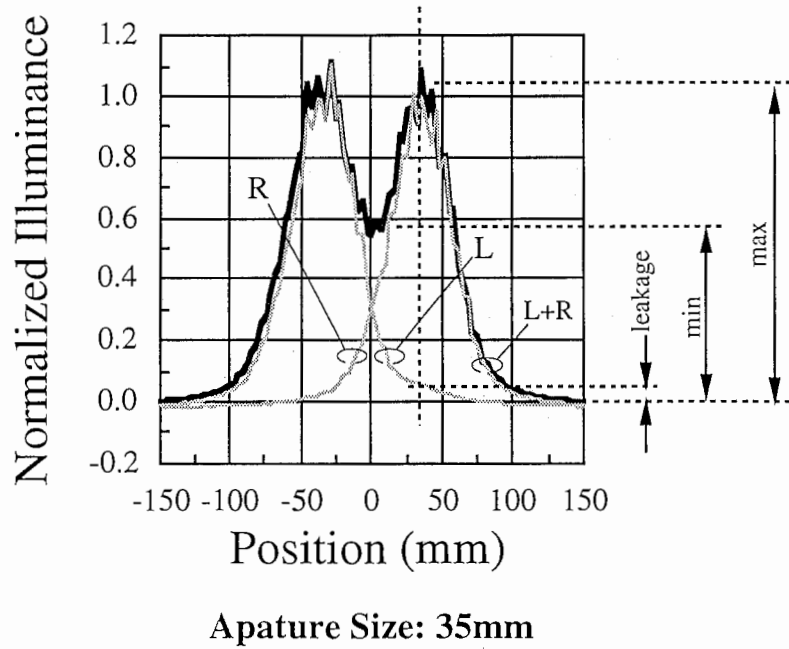


Fig. 14 Distribution of an Illuminance at the Viewing Position.

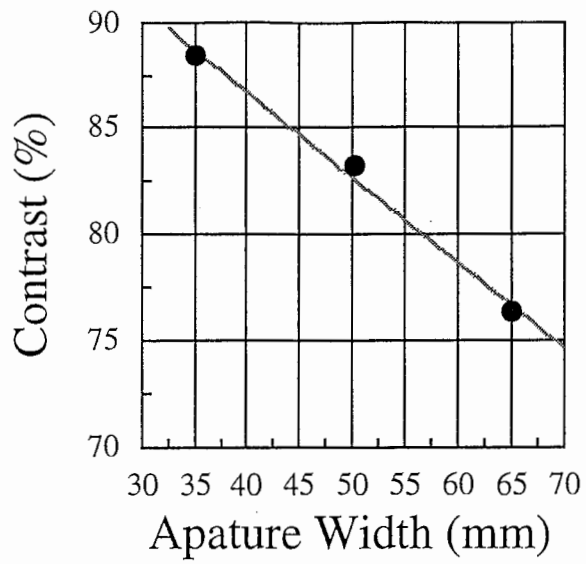


Fig. 15 Contrast Ratio v.s. the Width of Aperture Stop

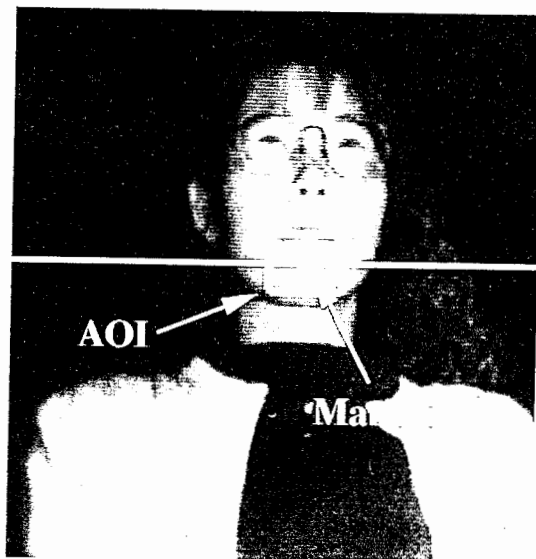


Fig. 16 (a) Infrared Illuminated Image obtained from the Measurement Camera

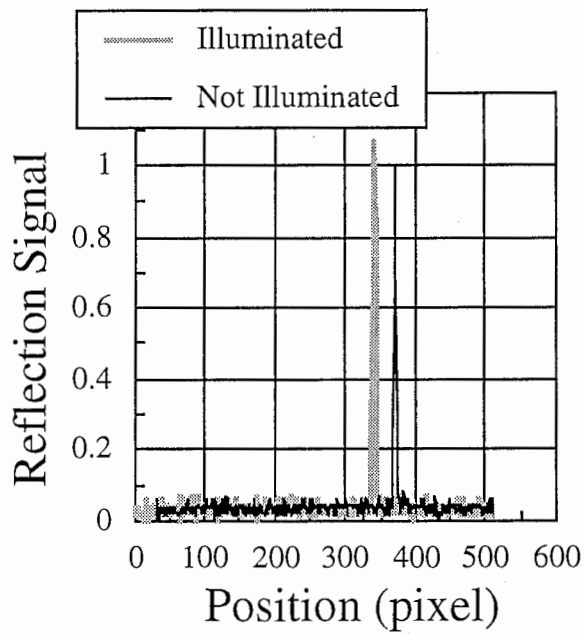


Fig.16 (b) Lateral Profile of Reflection Signal on the Marker

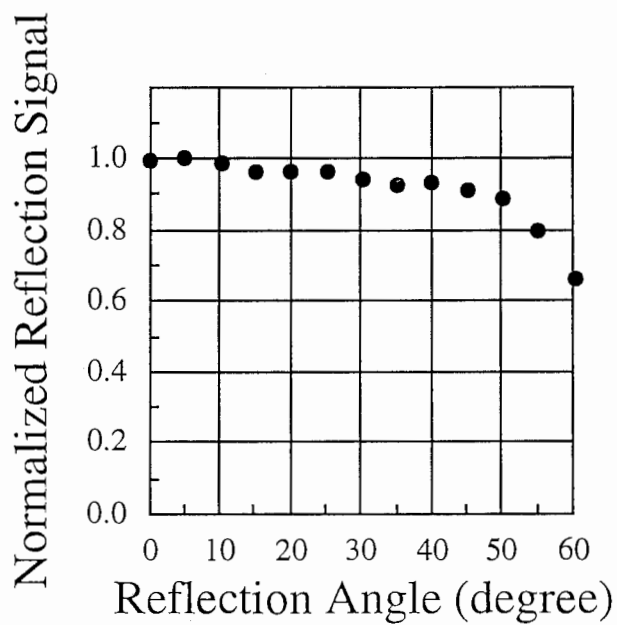


Fig. 17 Dependence on the Reflection Angle of the Reflection Signal from the Marker



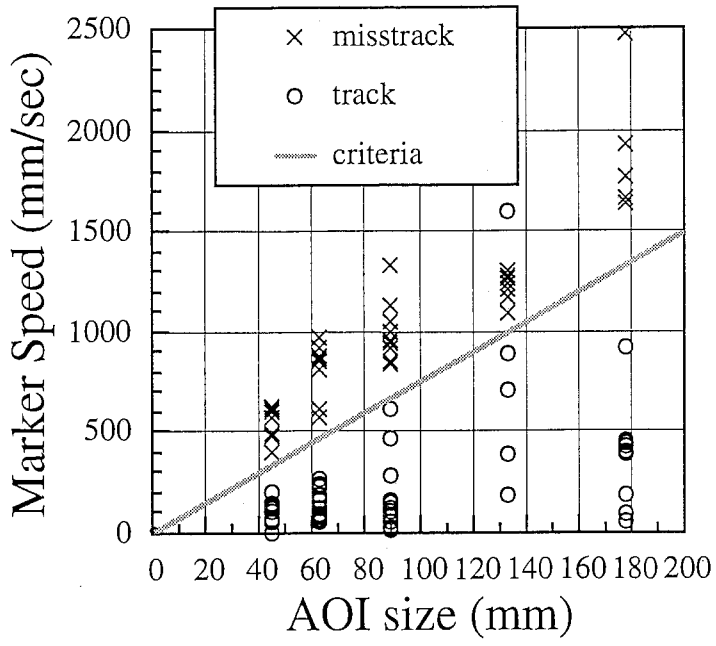


Fig. 18 Tracking Error Evaluation Depends on the AOI Size

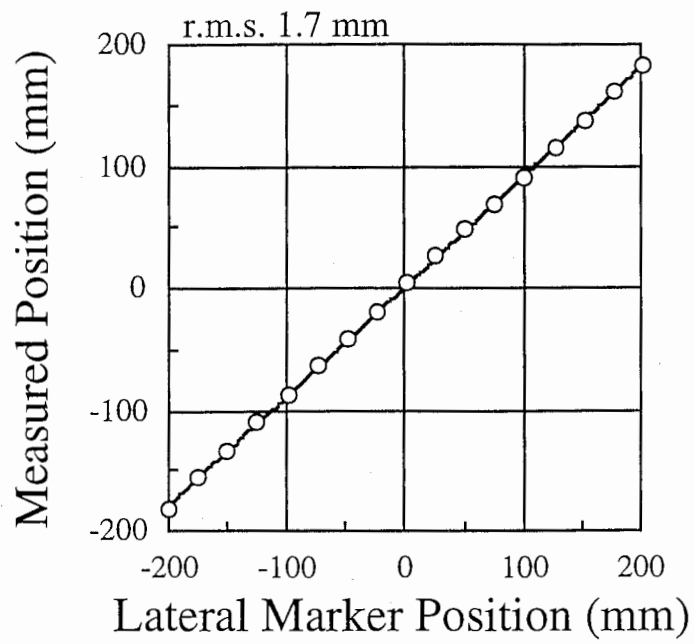


Fig. 19 (a) Measurement Accuracy of the Lateral Movement of the Marker

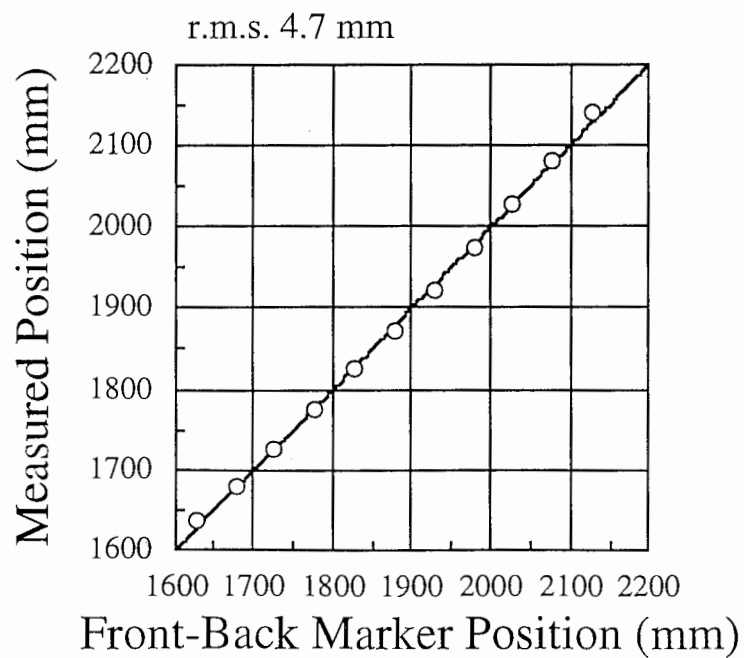


Fig.19 (b) Measurement Accuracy of the front/back Movement of the Marker

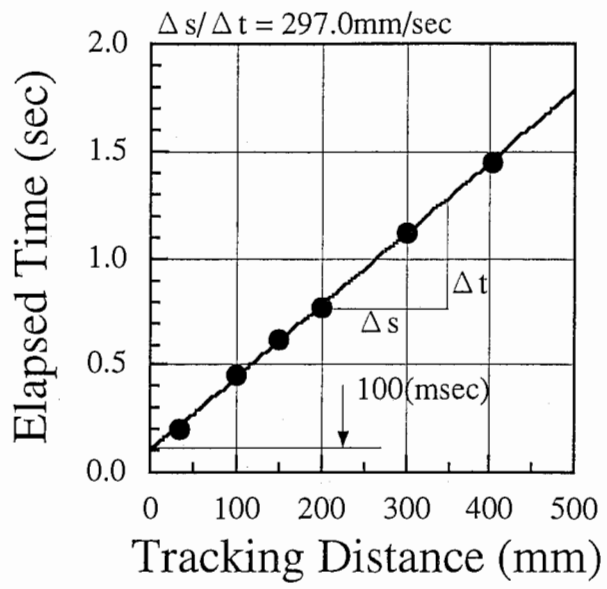


Fig. 20 Mechanical Tracking Response of the Projector