

が、遮蔽矛盾が起りにくいという特性を持つ再帰性投影技術はデスクトップ型 AR 作業環境と非常に相性がよく、本研究では再帰性投影技術を採用する。

第二の 3D バーチャル物体の提示位置検出は表示したい物体に磁気センサのレシーバを置く手法や、物体に貼付したマーカーを画像認識してその位置に重畳する手法がある。磁気センサを用いる手法は計測範囲内に存在する金属に対して非常に弱く、またスクリーンやユーザの手指など、すべてのインタフェースにセンサを取り付ける必要があり、汎用的なデスクトップ型 AR 作業環境には適さないと考えられる。マーカーを利用する手法に関しては平成 16 年度に研究済みである。木島らは、ユーザの視点近くの赤外光源と赤外線ビデオカメラを用いて、物体を提示するスクリーンである再帰性反射材上での高輝度反射を撮影することで物体の提示位置を検出している。本研究では、原理としてこの手法を利用し、計測精度の向上を目指す。

第三のユーザインタフェースについては、PHANToM やデータグローブなど、バーチャルな触覚の提示を行えるハードウェアを使用したり、指先やスタイラスなどの比較的単純な機構を画像認識したりしてポインティングデバイスとすることが多い。また、マーカー等を用いた手法は提示する実物体の位置取得には有効であるが、机上の作業を考えた際、検出の必要性が高い指先の位置取得には不向きである。本年度の研究においては、マーカー等を非装着で指先の位置を取得する手法について研究を行う。再帰性投影技術を用いた研究に関連した指先位置検出の例としては、木島らの研究で、指が再帰性反射

材スクリーン上にある場合、同軸光下では明瞭な指の影が生じることを用いて、指先位置の検出を確実に行う事に成功している。本研究では、原理としてこの手法を利用し、計測精度の向上と、再帰性反射材外での位置取得を可能とする方法について研究を行う。

B-8-2 再帰性反射材の位置・姿勢計測

再帰性反射材の位置および姿勢は、赤外同軸照明の点灯下で得られた赤外線ビデオカメラ映像から推定する。今回用いた手法は、木島らによる研究で用いられたものをベースとしている。以下にその内容を詳説する。

ビデオカメラの視点位置を原点 O として、下方が z 軸正である座標系を考える (図 24)。

3D バーチャル物体を表示するスクリーンとして、形状が既知の長方形 $ABCD$ ($BC=DA=r_x$, $AB=CD=r_y$) である再帰性反射材を用いる。赤外同軸照明下で、ある位置・姿勢に置かれた再帰性反射材 $ABCD$ を撮影すると、再帰性反射材の実形状をビデオカメラの視点 O からビデオカメラの光軸に垂直な面 (ここでは簡単のため机面とする) へ、点 O を中心として射影した映像が得られる。

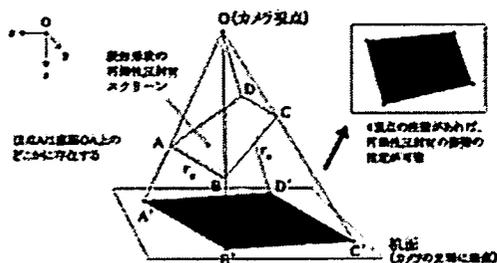


図 2 4 ビデオカメラで得られる
再帰性反射材の位置姿勢情報

この映像とビデオカメラの画角情報およびカメラと机面の距離情報を用いることで、机面上における再帰性反射材の正射影の各頂点座標 (A' , B' , C' , D') を求めることができる。ここで、実際の再帰性反射材の頂点 $ABCD$ は、それぞれ直線 OA' , OB' , OC' , OD' 上のどこかに存在することは明らかである。

ここからは、以上の条件を用いて、反復法で再帰性反射材の各頂点の位置を推測する。直線 OA' , OB' , OC' , OD' 上に仮の頂点 A_p , B_p , C_p , D_p を定め、各頂点の関係が再帰性反射材の形状と一致したときに反復を終了する。以下、反復計算の手法を示す。

- (1) まず、再帰性反射材の頂点 A の推定位置 A_p を机面上の点 A' にとる。
- (2) 隣の頂点 B の推定位置 B_p は、再帰性反射材の実形状パラメタより、直線 OB' 上に存在し、かつ A_p からの距離が r_y の点である。 B_p はある点 A_p を中心に半径 r_y の円を描いた時に、円と直線 OB' と交わる点と考えることもでき、条件によって 0, 1, もしくは 2 個求まる。
- (3) B_p が 1 つも求まらなかったときは、 A_p の推定が誤っていたと考え、 A_p の z 座標を一定値 Δz だけ減少させ、(2) に戻る。

- (4) B_p が 1 つ以上求まったら、2. と同様に頂点 D の推定位置 D_p も求める。 D_p が 1 つも求まらなかったときは、やはり A_p の推定が誤っていたと考え、 A_p の z 座標を一定値 Δz だけ減少させ、(2) に戻る。
- (5) B_p , D_p がどちらも 1 つ以上求まったときは、すべての B_p , D_p の組み合わせについて内積を求める。2.~5. の計算を反復し、内積の値が最も 0 に近い推定位置 A_p , B_p , D_p をそれぞれ A , B , D として反復計算を終了する。
- (6) 頂点 C については、すでに求まった頂点 A , B , D から計算する。

B-8-3 ユーザの指先位置・姿勢計測

机面上方の赤外線ビデオカメラで撮影された映像にはユーザの手指も映り込んでいる。したがって、適切な照明条件や画像処理方法を設定すればビデオカメラの画像からユーザの指先位置を検出することができる。

画像処理による指先位置検出は、EnhancedDesk に見られるような人体の発する赤外光を検出するものや、可視光で撮影された映像の肌色部分を切り出すものなど、様々な手法が既存の研究でも使われている。

再帰性投影技術を用いた研究に関連した指先位置検出の例としては、木島らの研究で、指が再帰性反射材スクリーン上にある場合、同軸光下では明瞭な指の影が生じることを用いて、指先位置の検出を確実に行う事に成功している。我々は、木島らの手法を改良して、指先が再帰性反射材スクリーン上にない場合においても確実な指先位置の認識を可能にすることを目指し、次に示す手法を考案した。

(1) 指先が再帰性反射材スクリーン上にある場合

ビデオカメラ視点での映像で、指先が再帰性反射材スクリーン上にある場合の指先検出は、木島らの研究に先例があり、我々もその手法を踏襲した。指先が再帰性反射材スクリーン上にあると、同軸照明下のビデオカメラ映像では再帰性反射材の高輝度反射内に明瞭な指先の影が落ちる（図 25）。

実際にカメラで再帰性反射材上の指の影を撮影すると、図 26 のような映像が得られ、PC による画像処理および指先形状のパターンマッチングを経て指先位置の検出が行われる。

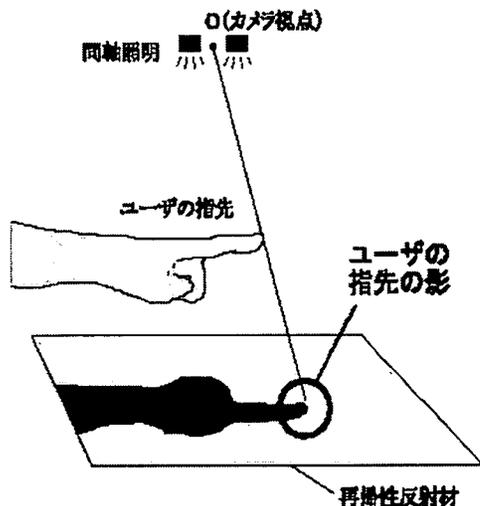


図 25 再帰性反射材スクリーン上の指先の影の模式図

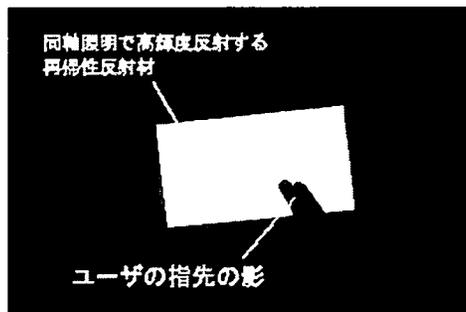


図 26 同軸照明下で実際に撮影された指の影

指先が再帰性反射材スクリーン上にない場合は、前項の手法を利用することができない。我々は、そのような場合でも指先検出を可能にするために、机面の下部にも赤外照明光源を設置することにした（以下、赤外下部照明または下部照明と称する）。

赤外下部照明は、机面を可能な限り一様に照明する、机面は 2D 映像をプロジェクションするために半透明なスクリーンが張られ、机面には可視光による 2D 映像と赤外光による一様照明が重畳した状態となる。下部照明が点灯しているときに机面の上部にユーザの指が存在すると、赤外線ビデオカメラで非常に明瞭な指の影を撮影することができる（図 27）。

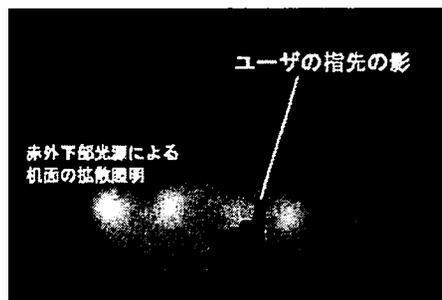


図 27 下部照明下で実際に撮影された指の影

この手法を用いるためには、一つのカメラで2種類の照明条件（同軸照明、下部照明）の映像を得る必要がある。そのために照明の時分割制御を行う。照明の切り替えは、安定性の高さを重要視し、赤外線ビデオカメラのフィールド切り替え同期方式を選択した。

B-8-4 試作システムの構築

デスクトップ型 AR 作業環境の構成のうち、技術的な課題として、再帰性投影技術と赤外線画像解析による物体姿勢・指先位置検出が両立を実証するため試作機を製作した。図28にシステムの構成を示す。

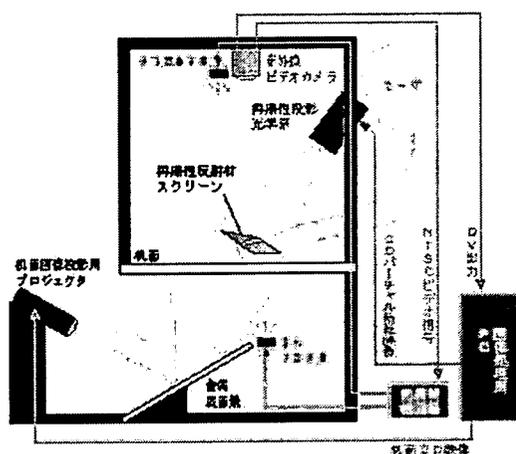


図28 試作機の構成

机面の高さは一般的に670~700mmが良いとされる。しかし、人間の手作業の至適高は肩峰より肘頭高の15cm下までとかなり広く、作業内容によっても異なるため、汎用作業環境に至適な机面の高さを一概に求めることはできない。そのため、試作機の机面の高さは、下部から机面への2D映像投影にある程度の距離が必要なことや、赤外下部照明の収納を考え、760mmに設定し、椅子の高さを調節することでユーザの体格および

作業内容に適合させることにした。机面の大きさは、ある程度作業内容に自由度を持たせられるように幅800mm奥行き600mmの長方形とした。机面は厚さ10mmの透明アクリル板を使用し、キクチ科学社製の背面投影スクリーンRS13Kを貼付した。筐体は、幅50mmの鉄製L字アングルを図29のように組み合わせて作成した。

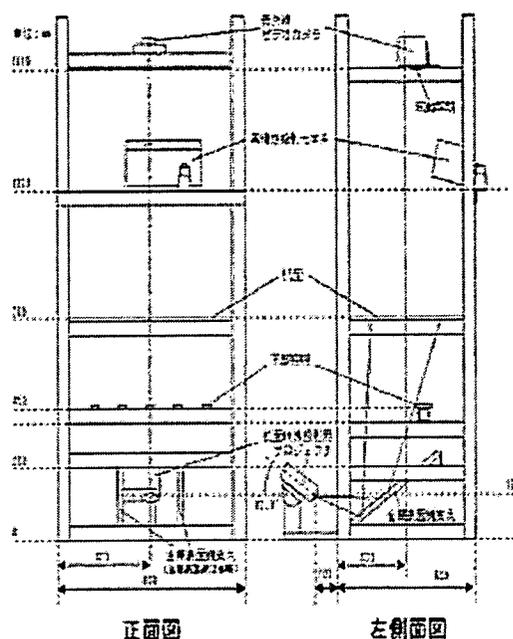


図29 試作機筐体

3Dバーチャル映像を提示する再帰性投影光学系は、プラスビジョン社製の高輝度小型プロジェクタV-1100Zと、エドモント・オプティクス社のプレート型ビームスプリッタを組み合わせたものを使用した。なお、光学系から作業フィールドまでの距離が短いため、使用するプロジェクタには短焦点化改造および絞り取り付け改造を加えた。

机面を撮影する赤外線ビデオカメラには、SUPER NIGHTSHOTモード（赤外光撮影モード）を持つSONY製のDVカメラ

「DCR-PC9 NTSC」を使用し、固定具を介して L 字アングルに固定した。カメラのレンズは机面の中央（左端より 400mm、手前
端より 300mm）の点の直上 850mm の点に位置し、光軸は机面と直交させた。DCR-
PR9 の SUPER NIGHTSHOT モードでは赤外光だけでなく可視光も感知してしまう
ため、Schott 社製のロングパスフィルター
ガラスを用いて赤外光のみを感知するよう
にした。

同軸照明および下部照明には、三洋電機社
製の赤外 LED「SLR-938CV-7K」を使用し
た。赤外 LED10 個および明るさ調節のため
の半可変抵抗を直列接続したものをユニ
ットとし、同軸光源にはユニットを 1 個、下
部光源にはユニットを 5 個並列に使用した。

B-9 X' tal Scope システムの構築

B-9-1 X' tal Scope のシステム構成

X' tal Scope のシステム構成は図 3 0 の
ようになっている。X' tal Scope 本体は 5 自
由度のアームと、頭部に設置された 2 台の
プロジェクタから成る。アームの自由度配置
を図 3 1 に示す。アームの各関節に配置され
たエンコーダの値から観察者の視点位置及
び視線方向を計算し、それに応じた映像を、
観察者の視点と光学的に共役な位置に置か
れた 2 台のプロジェクタによって再帰性反
射材のスクリーンへ投影する。これによっ
てバーチャルな物体があたかもスクリーン位
置に存在するかのように、立体感を持って提
示することができる。

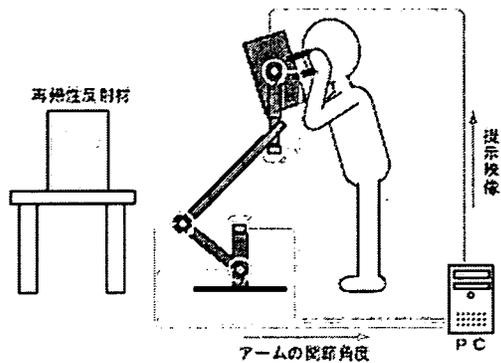


図 3 0 X' tal Scope システム構成

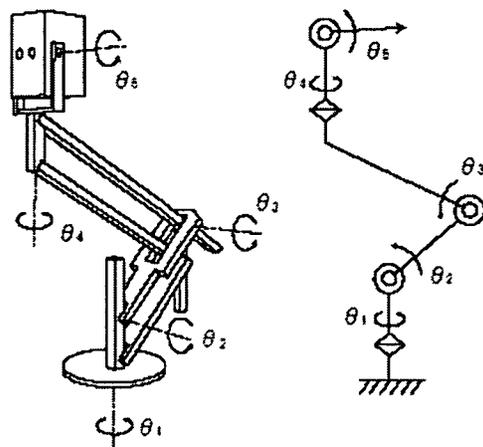


図 3 1 自由度配置

B-9-2 RPT システムの改良

2 台のプロジェクタの投影部間水平方向
の距離は、人間の平均的な眼間距離である
65mm としなければならない。また、人間の
視野は水平方向に広い横長の形であるため、
投影する映像も同様に横長であることが望
ましい。本試作機で用いたプロジェクタ（昨
年度試作機は PLUS V-1080、本年度改良機
では東芝 TDP-FF1A）の場合、左右に横向き
に並べる配置では投影部間の水平方向の距
離が眼間距離より大きくなってしまい、昨年
度の試作で採用した縦向き配置では投影映
像が縦長になってしまう問題点があった（図

3 2)。そこで図3 3に示されるように2台の 프로젝터를上下に配置し、ハーフミラーを交差させて置くことで上記の問題を解決した。 프로젝터를上下に配置する場合、 프로젝터間の上下方向の距離が問題となる。上下間の距離が近いほど、要求されるハーフミラーのサイズは小さくなり、装置をコンパクトにすることができる反面、ハーフミラーを透過した光がもう一方の 프로젝터に当たった反射光の影響が大きくなる。よって、反射光の影響という観点からは上下間の距離は装置の大きさの許す限り離して配置するのが望ましい。しかし、左右のハーフミラーを交差させた配置であるため、左右それぞれのハーフミラーに 프로젝터から映像を投影できる範囲は限られている。上下間の距離が遠ければ、投影映像がもう一方のハーフミラーの領域に入り、その結果画像が途切れることになるため、上下間の距離には上限がある。この上限は 프로젝터の水平画角によって求めることができる。X' tal Scope の頭部では以上の点を考慮し、画像の途切れない範囲でできるだけ離れた位置に上下の 프로젝터를配置している。また、反射光の影響は吸光材として黒色のフェルトを反射部に貼ることによって軽減が可能である。

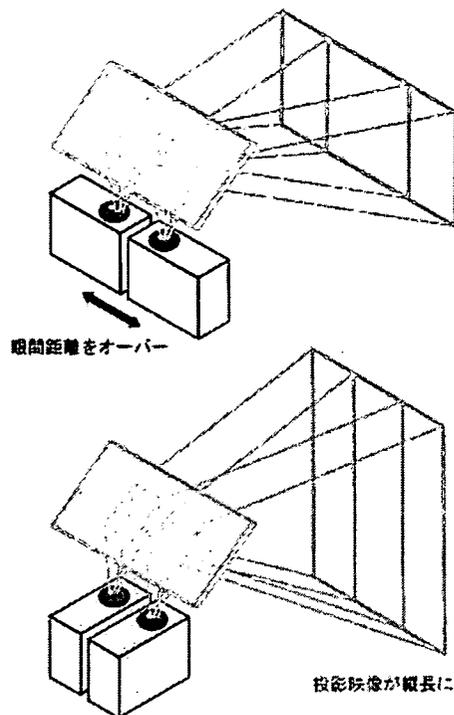


図3 2 プロジェクタの配置

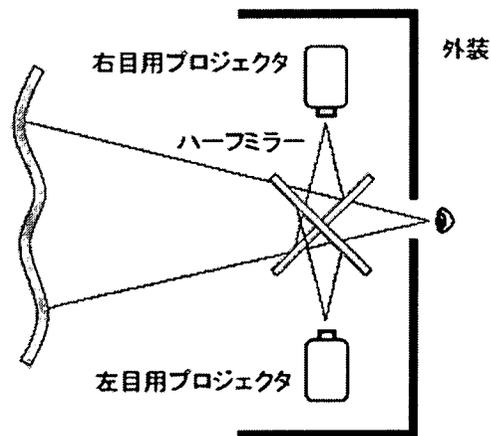


図3 3 改良後の光学配置

B-10 X' tal Visor システムの改良

RPT 光学系はオプティカルシースルー HMD 光学系とほぼ同じ構造を持っている。しかし従来のオプティカルシースルー HMD 光学系と異なり再帰性反射材をスクリーンとして用いることで様々な利点があ

る。まず、再帰性反射により、高い輝度が得られる。画像投影部の開口径を光量の許す限り絞り込むことで、大きな焦点深度を持ち、任意形状、任意位置のスクリーンに対し広い範囲で結像可能である点も大きな特徴である。また、再帰性反射材が塗布可能なすべての物体をスクリーンとして利用可能なため非常に軽量のディスプレイを実現可能であり、手などの物体では投影光は散乱し、スクリーン面では高い輝度で反射することにより、適切な遮蔽・前後関係を保持した投影が可能であるということである。

しかし、この光学系ではハーフミラーがあるため完全な開放型とは言えず、視野角もハーフミラーの範囲に制限される。視野角を広くするためにはハーフミラーを大きくしなくてはならず、開放感が損なわれることになる。またハーフミラーには外部からの光が映りこむ、光損失が大きいという欠点もある。そこで開発されたのが X'talVisor 光学系である(図34)。X'talVisor は前項の RPT 光学系におけるハーフミラーを小型の全反射ミラーに変え、投影レンズを通して収束した光線をスクリーンに反射させる。十分に小型のミラーを用いることによってほぼ障害物のない状態で画像の観察が行える。つまり、X'talVisor はフルオープン型の HMP (Head-Mounted Projector) であるといえる。

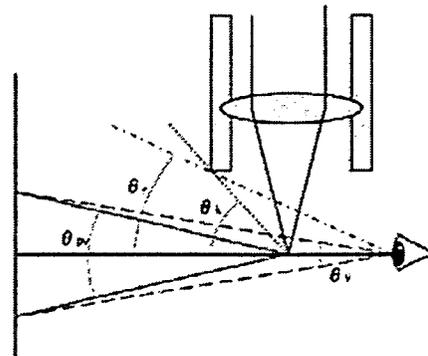


図34 X'talVisor 光学系の概略

X'talVisor 光学系のまず改善されるべき課題として実視野角向上の必要性がある。試作した X'talVisor の実視野角はおおよそ 26[deg] (水平) 20[deg](垂直)である。

ヒトの視覚特性から一般に、通常の視覚ディスプレイでは水平視野角 30[deg]前後から臨場感を感じ始め、100[deg]前後では最大になると言われている。また、主観的な予備実験ではあるが、垂直実視野角が 15[deg]前後以下になると著しく視野が限定されると感じ始めるとの実験結果を得ている。

試作した X'talVisor は視野の限定感の限界はクリアするものの臨場感の提示には視野角の向上が必要である。また、X'talVisor を実体形状ディスプレイに使用した際、頭部を動かさない状態での提示にはある程度の実用性が確認できたが、ふと頭部を移動した際に観察物体が AR 画像の提示される視野から外れ、AR 画像が途中で切れるという著しい違和感が生じ、実用の際の大きな問題となるであろうことが確認された。

また、頭部に装着するという形状上の制約から光学系のレンズホルダ等の機構が光学系に干渉する、いわゆるケラレの問題が設計上生じることも確認された。(図35)これ

は垂直方向の実視野角を損なう要因となる。

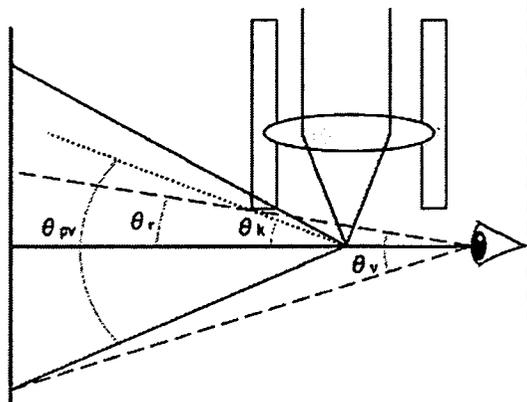


図 3 5 ケラレの発生

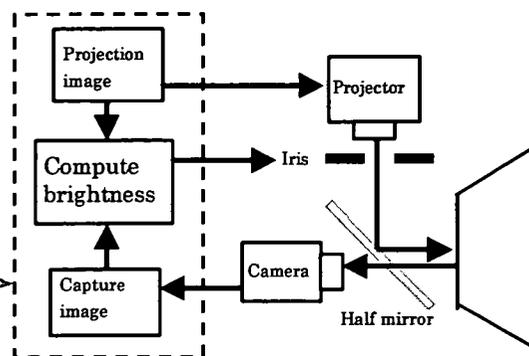


図 3 6 輝度動的補償システム

絞り調節の手順は以下のようになる。

我々は形状提示型あるいは触覚提示型のディスプレイと X'talVisor を組み合わせることにより高度な実世界指向型ディスプレイシステムの実現を目指す。

C. 研究結果

C-1, C-2 節は前節との整合性をとるため欠節とします。

C-3 焦点深度と輝度の確保・補正の両立

C-3-1 絞りをを用いた輝度の動的補正システム構成

システム構成を図 3 6 に示す。絞り（エドモンド社製 φ37mm ゼロ開口アイリス絞り）を通したプロジェクタ（Epson 社製 ELP-710、輝度 1000[ANSI lm]、水平画角 32[deg]）画像を、ハーフミラー（エドモンド社製 45[deg] 入射時 50%反射、誘電体蒸着型）を介して再帰性反射材のスクリーンに投影し、投影された画像をプロジェクタと同軸に配置したカメラにより撮影する。撮影画像は解像度 320×240、24bit カラー、30fps を使用した。

- I.絞りを全開で白色の映像を提示したスクリーンと、白色物体をカメラで撮影し、それぞれ画像内での輝度値を計算する。
- II.何も投影していないスクリーンと、黒色物体をカメラで撮影し、それぞれ画像内での輝度値を計算する。
- III.I、IIより、プロジェクタのダイナミックレンジを計算する。
- IV.画像を投影したスクリーンの最大輝度と、提示する画像が目標とする最大輝度の差分を取り、差分を無くす方向へ絞りの開閉を行う。

C-3-2 システム実装

以下に実験の結果を示す。投影画像としては、現実との輝度差が分かりやすいように現実の背景を撮影したものをを用いた。

なお、ダイナミックレンジを大きく取るために、再帰性反射材スクリーンに暗色の物を用いている。投影の様子を図 3 7 に示す。右側が φ3mm 固定のピンホール使用時、左側がアイリス絞りによる輝度補正時のスクリーンである。φ3mm のピンホール使用時は、

開口径が小さいために光量が確保できず、投影画像がほとんど視認出来ない。アイリス絞り使用時は、輝度が適切に補正された背景画像が提示されているのが確認できる。

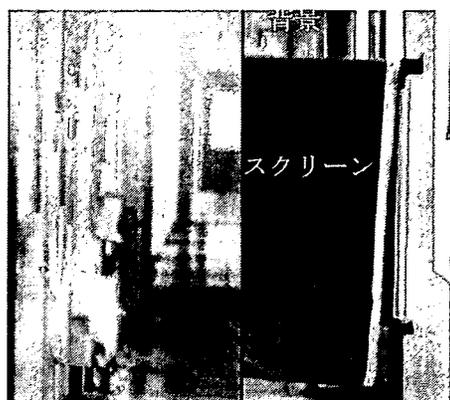


図 3 7 輝度動的補償の実現
(左)アイリス絞り (右)φ3mm ピンホール

C-4 RPT を用いた視覚提示系の心理物理学的検証

C-4-1 融像可能範囲に関する検証実験

まずスクリーン位置、提示物体の大きさを一定とし、スクリーンの大きさを変化させた結果について述べる。

図 3 8、図 3 9 は、スクリーン位置 100、50[cm]、提示物体の大きさが直径 1[deg]の場合の、スクリーンの大きさ(視角)と融像可能な両眼視差の関係を示す。プロットした点は各回の値の平均であり、誤差棒は標準偏差を表す。

ここで、融像可能範囲は図 4 0 に示す両眼視差の値により表す。これはスクリーン面上の点と提示物体の間の両眼視差を表し、絶対値が大きくなるほど、物体の提示位置がスクリーン面から離れる。非交差性視差の場合は両眼視差は正の値を、交差性視差の場合は負の値をとるものとする。

よって、図 3 8、図 3 9 のグラフ内で一つのスクリーンの大きさ(視角)に対して、2 点がプロットされているが、青点で示される値の小さな方(負の値をとる方)がスクリーンより近い物体を見る限界の場合の両眼視差を、赤点で示される値の大きな方(正の値をとる方)がスクリーンより遠い物体を見る限界の場合の両眼視差を表している。

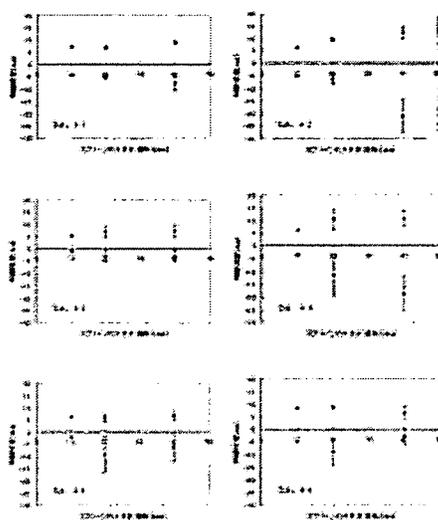


図 3 8 スクリーンの大きさと融像可能範囲の関係(スクリーン距離:100[cm], 提示物体の大きさ:直径 1[deg])

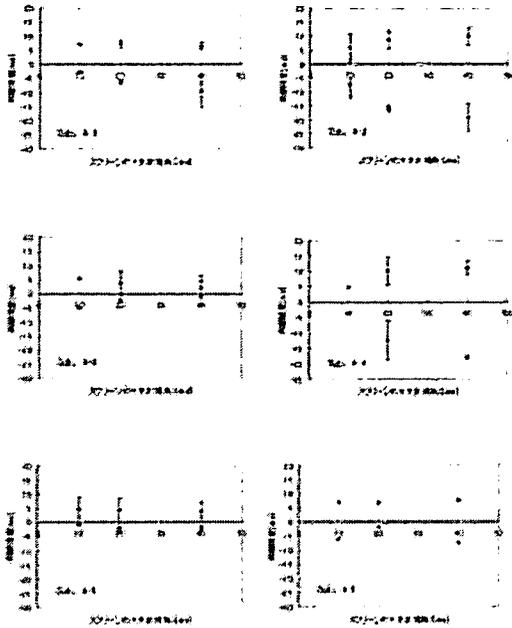


図39 スクリーンの大きさと融像可能な両眼視差の関係 (スクリーン距離: 50[cm], 提示物体の大きさ: 直径1[deg])

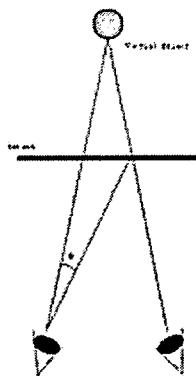


図40 両眼視差

次にスクリーンの大きさと提示物体の大きさを一定とし、スクリーン距離を変えた場合の結果を図41、図42に示す。これらの図はスクリーンの大きさ(視角)が40, 20[deg]提示物体の大きさが直径1[deg]の場合のスクリーン距離と融像可能な両眼視

差の関係を示す。

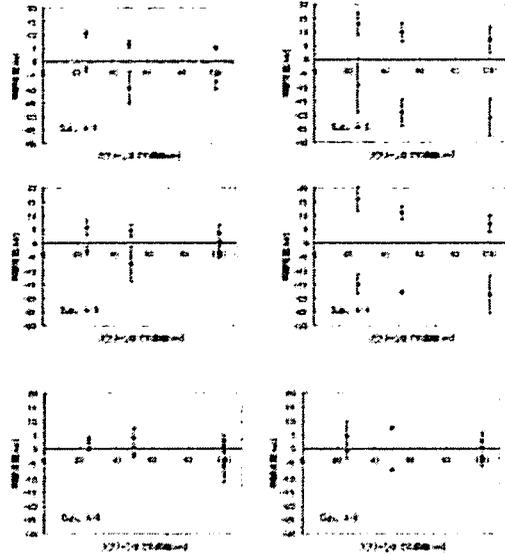


図41 スクリーン距離と融像可能な両眼視差の関係 (スクリーンの大きさ(視角): 40[deg], 提示物体の大きさ: 直径1[deg])

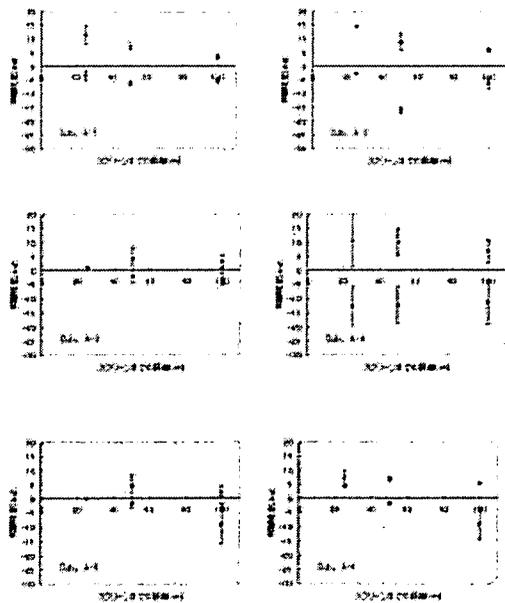


図42 スクリーン距離と融像可能な両眼視差の関係 (スクリーンの大きさ(視角): 20[deg], 提示物体の大きさ: 直径1[deg])

次に、スクリーンの距離と大きさを一定とし、提示物体の大きさを変えた場合の結果について図43に示す。図はスクリーン距離を100[cm]、スクリーンの大きさ（視角）を40[deg]とした場合の、提示物体の大きさと融像可能範囲の関係を示す。

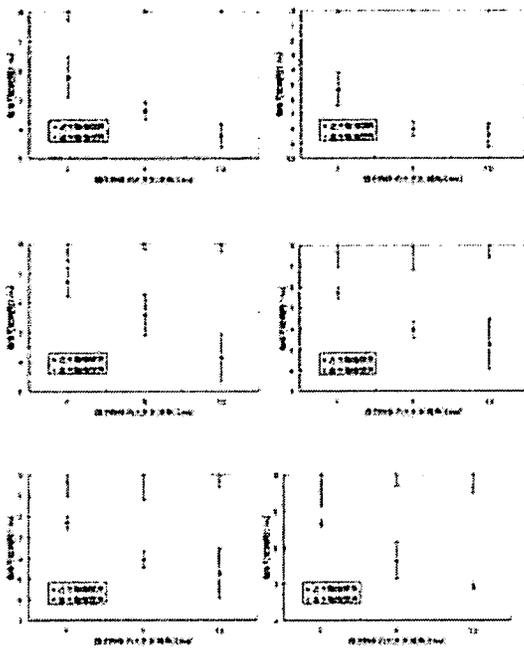


図43 提示物体の大きさと融像可能範囲の関係(スクリーンの大きさ(視角):40[deg], 提示物体の大きさ:直径1[deg])

C-4-2 奥行き知覚に関する検証実験

図44、図45は、実物体の距離を50,100[cm]とした場合の、各スクリーン位置において被験者が調整した提示物体の位置を表した結果である。

縦軸は被験者が調整した両眼視差量を眼間距離65[mm]として提示物体の奥行距離に変換したものである。

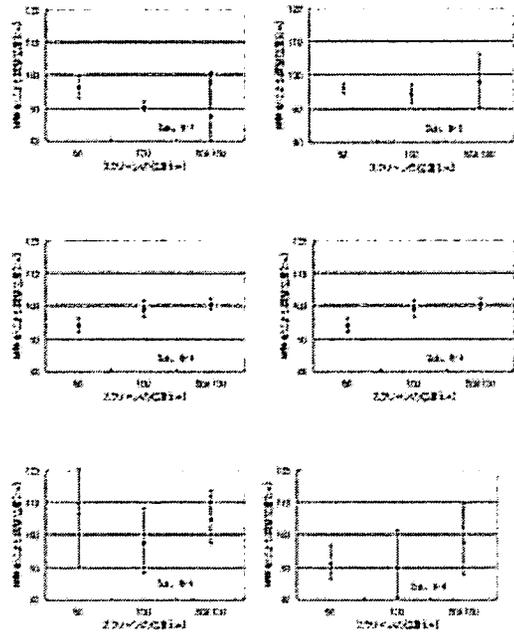


図44 スクリーン位置と被験者の調整した提示物体位置の関係(実物体位置:100[cm])

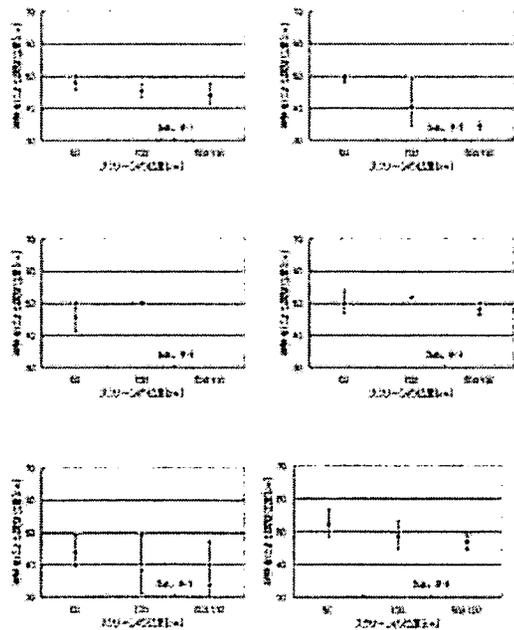


図45 スクリーン位置と被験者の調整した提示物体位置の関係(実物体位置:50[cm])

C-4-3 大きさ知覚に関する検証実験

結果を図46に示す。縦軸は比較対照の実物体の大きさ（直径）を1としたときの、正規化された提示物体の大きさである。

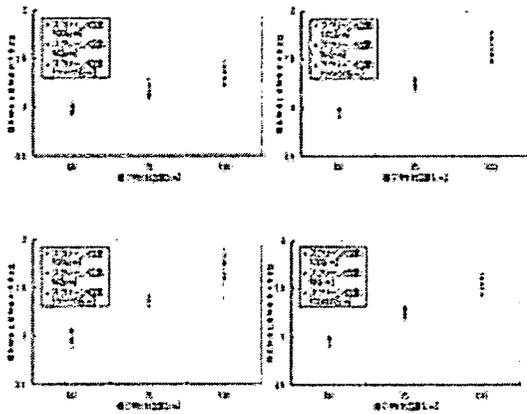


図46 提示物体位置と提示物体・実物体の大きさ比の関係（実物体位置：100[cm]）

C-5 スクリーン機能と3次元位置計測用のマーカー機能の両立

C-5-1 システム構成

システムはマーカーを設置したスクリーン、スクリーンに投影する為のプロジェクト、マーカー検出用のビデオカメラ、PC、マーカーを照明する専用光源からなる。（図47）

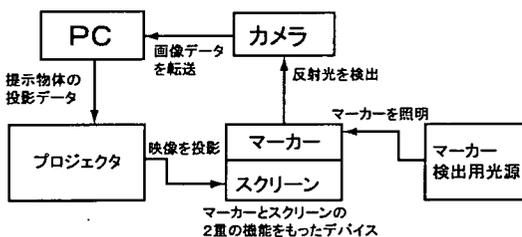


図47 レジストレーションシステム構成

スクリーン上に配置されたマーカーの映像はビデオカメラによって撮影、PCに送信されてスクリーンの位置を検出することに

なる。そしてPCは、そのスクリーン座標に応じた適切な映像のデータをプロジェクトに送り、スクリーンへと投影させる。算出されたスクリーン座標は実際にはカメラ座標系に関するものであるが、今回はユーザの目の座標系からのものとほぼ同一視して構わない。なぜならカメラとユーザの眼は、ほぼ光学共役点に置かれているためである。そのため今回のシステムではユーザの視点は固定であり、固定された位置からスクリーンを覗き込むようになっている。

C-5-2 不可視マーカーの実装法

マーカーを通常の不透明な素材で作ると、その部分の再帰性反射を損なってしまう。そこで我々は、プロジェクトからの投射光を極力透過させ、再帰性反射を損なわない不可視マーカーを実現するための2種類の方法を、以下に提案する。

C-5-2(1) 赤外線方式

第1の手法として可視光波長では透過性が高く、非可視光波長（赤外領域）では反射性が高い素材を再帰性反射材に重ねる手法を提案する。すなわち近赤外線は吸収し、可視光極力透過させる素材でマーカーを製作し再帰性反射材の上に設置する。カメラと近似的に光学的共役点となる地点から赤外光を投射し、マーカーからの反射光を赤外線カメラによって撮影することにより、マーカーの検出が可能となる。（図48）

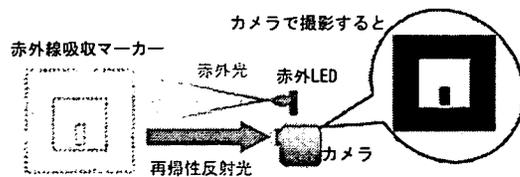


図 4 8 赤外線方式原理図

この方式の特長としてはカメラに可視光カットフィルタを取り付けて撮影することにより、プロジェクタからの投射光はカメラには届かず、またユーザには見えない赤外光を検出に用いることで、マーカー検出光と投射映像がほぼ完全に分離したシステムが構築できる点である。この利点としては、プロジェクタからの投射光による画像認識への影響が避けられることや映像の観察時に障害を起こすマーカー検出光が眼に入らずに済むことが挙げられる。

今回は赤外光を強く吸収する素材として、車窓用の断熱フィルムとして市販されているカーフィルムを使用した。この製品は車の窓ガラスに貼ることで可視光は透過させるが日光の赤外線を遮断し、車内の温度の上昇を防ぐことを目的とする製品である。望ましいフィルムの性能としては、透過率・反射率が赤外照明用 LED のピーク波長である 945[nm] 付近では極力低く、可視光域 380[nm]~780[nm]では逆に高くなる必要があるとされる。今回は該当すると思われる断熱フィルムのうち、アルフォリア・ジャパン(株)社の製品"SC2000"およびアイケーシー(株)社製品"FGR-2500"を用いて実験を行った。以下にその波長ごとの透過特性を示す(図 4 9、図 5 0)。

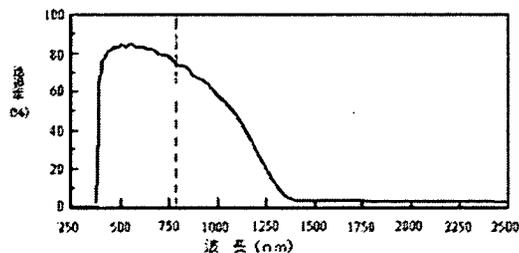


図 4 9 透過特性(SC-2000)

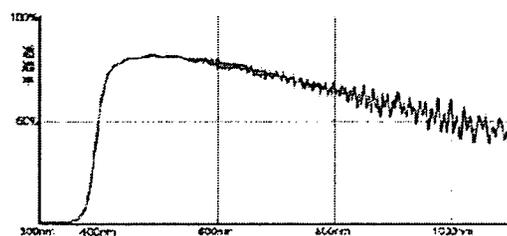


図 5 0 透過特性(FGR-2500)

これらのフィルムの特性より、1300[nm]以上の波長の赤外光を用いるとすると、"SC2000"の場合透過率が約 5%に低下する。よって吸収率を 0%と仮定しても反射率は 95%なので、斜め方向の入射は計算上約 2.6%の再帰性反射率となる。これは吸収率を 0 として考えた値であり、実際にはこの結果より小さい値になりより高いコントラストを得ることが可能であると予測される。しかし 1300[nm]までの波長を撮影できるカメラを用意するとどうしても特殊な機材になってしまい、安価なシステムの構築の障害となる。今回、このシステムに想定しているカメラは、1000[nm]前後までの近赤外光を撮影可能な CCD カメラである。波長が 1000[nm]前後では透過率は上記の 2 製品とも約 50%であり、先ほどと同様に再帰性反射率の最高値を算出すると約 50%となる。これが十分な値かどうかの判断は、以下のように画像認識の手順を考慮して考える必要

がある。

C-5-2 (2) 偏光方式

第2の手法として偏光フィルタを用いる手法を提案する。すなわち偏光版を適切に配置することで観察する視点(眼・カメラ)によって透明・非透明となるよう光学系を設計する。今回は1/4波長板の旋光性を応用した透明マーカーである。まず、左回り円偏光をマーカー検出光として、カメラと(近似的に)共役点となる地点から投射する。スクリーン表面には1/4波長板をマーカーの形状に加工して設置し、検出光の反射を右回りの円偏光板を介して撮影する。波長板の置いていない部分に投射された検出光はハーフミラー、スクリーンと2回反射をして右回り円偏光になった状態でカメラに入射する。一方波長板が置いてある部分に投射された検出光は、上記に加えてさらに π ずれるので右回りとなって帰ってくる。両者の光をそのまま観測したのでは輝度にはほとんど差はないが、左回り円偏光板を介して観測すると1/4波長板を置いた部分は光がキャンセルされ、黒く観測されることになる(図5-1)。なお、ハーフミラーは極力、偏光に影響をおよぼさないものを使用する。

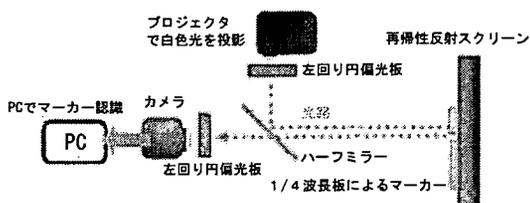


図5-1 偏光方式構成図

このシステムの特長としては波長板は可視光の透過率が高く、再帰性反射にほとんど

影響を与えずに済むという点が挙げられる。ただし、波長板はずらす位相の値に角度依存性があり、検出光の入射角によっては十分なコントラストをとることが困難になる可能性がある。

C-5-3 実験システムの構築

今回使用したマーカーのデザインは図5-2に示す形状をしている。マーカーは8cm×8cmの黒枠とその中にある識別用のパターンからなっており、複数の物体提示を行うことができる。赤外線方式、偏向方式の項で述べた素材を加工したマーカーをカメラで撮影したのち、次のような手順でマーカー認識を行う。

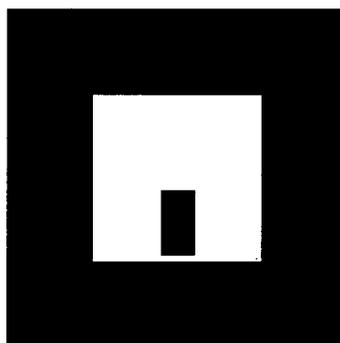


図5-2 マーカーのデザイン

まず入力画像を一定の閾値によって二値化し、連結領域の面積と外接長方形を求める。次に、面積値によってノイズを除去した後、連結領域の輪郭線追跡を行い、4本の線分によって近似できる領域をコード候補とする。コードの識別は、あらかじめ登録されたパターンとのテンプレートマッチングで行う。本実装では、マーカーの検出および変換行列計算は公開されているARToolKitのライブラリを利用した。

C-5-3(1) 赤外線方式の評価実験

本項では赤外線方式についての評価実験について述べる。用意した断熱フィルム2種類(FGR2500 および SC2000)のうち、どちらがより目的に適しているかを判断する。そのために、フィルムを貼ってない部分と貼ってある部分では角度、距離に応じた輝度信号の差を赤外光と可視光に分けて測定する。可視光の場合は輝度信号の差が小さいほど色再現性の性能が高く、赤外光の場合は輝度信号の差が大きいほど、マーカー認識の際のコントラストが高く取れることになる。またそれによって、マーカー認識に最適な2値化のための閾値を推定する。

なお、本実験の構成では可視光についてはカメラを介したRGB信号を測定した。本実験で得られたRGB信号をもとにマーカー部の輝度補正も可能である。

まず再帰性反射材を貼った一辺25cmの正方形のスクリーンを4分割し、2種類のフィルムを反射材の上に貼りこれを実験用のスクリーンとした。赤外線カメラの赤外照明の電源を入れスクリーン全体に当たるように調整した。その後、カメラのレンズとスクリーン中央間の距離を x とし $x=60\text{cm}$, 90cm , 120cm の3つの場合について以下のように計測した。カメラの光軸とスクリーン法線の成す角を θ [deg]とし、 $\theta=0$ [deg]から 60 [deg]まで 10 [deg]刻みに回転させながら

ビデオカメラから得られるスクリーン上の画像をPC上で静止画としてキャプチャした。キャプチャした後、スクリーンのフィルムが有無による輝度の比較を行うため、静止画中のスクリーン中央の縦軸に沿った輝度の分布を計測し、フィルムを貼った部分の輝度と貼ってない部分の輝度の平均値の比を求め、距離 x ごとにグラフ化した(図5.3)。

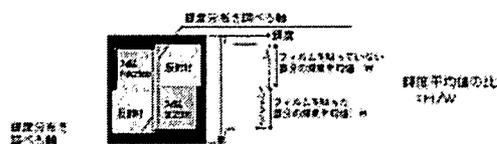


図5.3 計測の軸

今回、輝度と呼んでいる値は実際にはビデオ信号のRGB値の加重平均で得られるもので、以下のように定義される。

$$lu=0.298912r+0.586611g+0.114478b$$

なお、この輝度信号への変換をYIQ変換と呼ばれる。

実験の結果として FGR2500 の輝度分布のグラフを図5.4に示す。

縦軸が輝度の値を示し、0~255の値をとる。なお、横軸は輝度分布を取得した軸上の静止画像上における座標値を示している。このグラフ全ての中央付近に急激な変化があるが、これがフィルムを貼ってある部分と貼っていない部分の境界である。

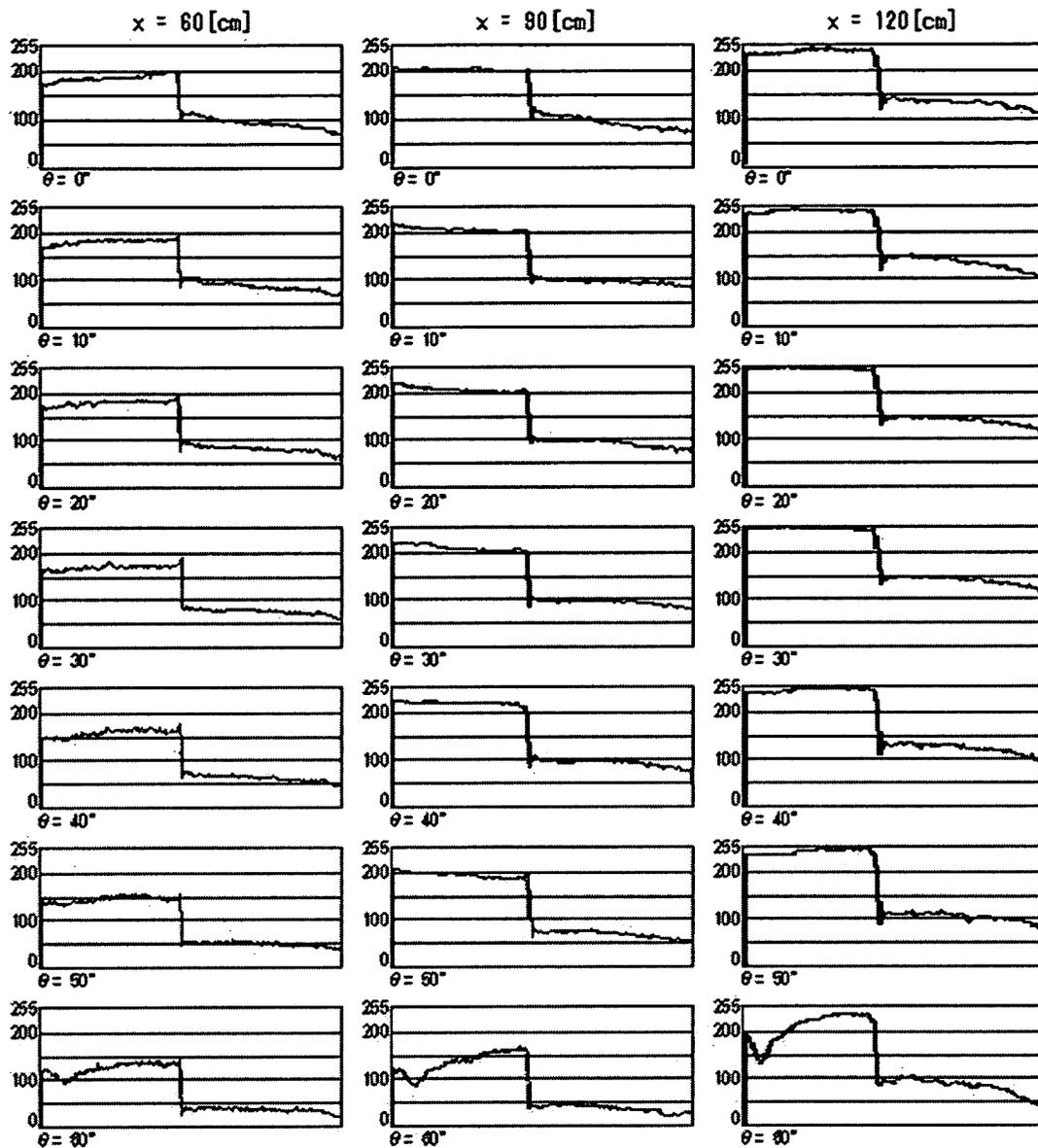


図 5 4 試料 FGR2500 における赤外光反射の輝度分布

フィルムを貼った部分の再帰性反射率のグラフを図 5 5 に示す。グラフ横軸がスクリーンの角度 θ [deg]、縦軸が輝度比[%]を意味している。図 5 5 で枠内にある 60,90,120cm というのはカメラ・スクリーン間距離 x の値を示しており x の値ごとにグラフを色分けして示してある。図中の枠内で例えば"60cm(FGR2500)"などとある

のは、FGR2500 を貼った部分でカメラ・スクリーン間距離が 60cm のときのデータを意味する。他も表記も同様である。

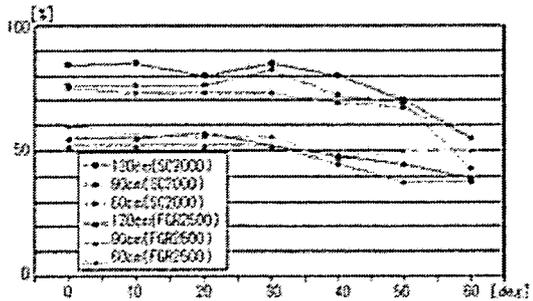


図55 赤外反射光輝度の距離角度依存性

結果から言える事は、FGR2500の方がSC2000より全ての θ 、 x において輝度比が低いという点である。これは、FGR2500の方がSC2000より赤外光の吸収性能が強いことを示す。さらに、どちらのフィルムとも、 θ が大きくなるにつれ輝度比がすこしずつ低下している。また、図55では $x=120[\text{cm}]$ においては $x=60,90[\text{cm}]$ のときと比較して全体的に輝度が高くなっている。これは赤外照明とカメラは厳密には光学共役の関係になっていないため、ある程度カメラ-スクリーン間の距離が小さいと、反射材からの拡散光が十分には届かないためと推測される。

続いて可視光の輝度信号の測定を図56に示す装置においてプロジェクタにRGB信号((255,0,0) (0,255,0) (0,0,255))および白色光(255,255,255)の赤、緑、青、白の色を投影させ、赤外光の実験と同様の角度、距離で画像をキャプチャした。

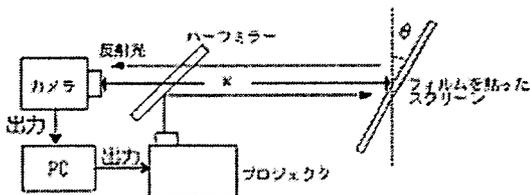


図56 可視光反射輝度計測法

その後画像中のRGB信号の値、あるいは白色光の場合は赤外光と同様にYIQ変換で得られる輝度信号から得られる輝度(RGB信号の)平均値の比のグラフを赤外光の実験と同様に作成した。フィルムの種類は各々のグラフ上部に記してある。なお、本実験でキャプチャに使用したカメラはソニー製DVのDCR-TRV900である。RGB信号および白色光の場合ごとに、"FGR2500"と"SC2000"の結果を並べて図57~図60に輝度比のグラフを示す。

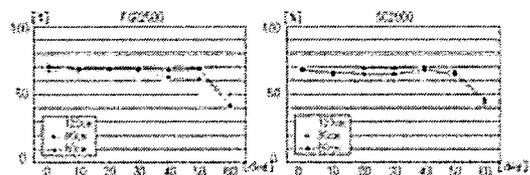


図57 赤色光反射輝度

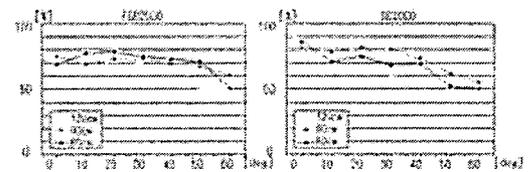


図58 緑色光反射輝度

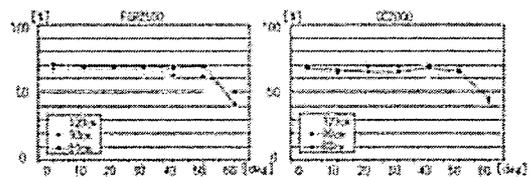


図59 青色光反射輝度

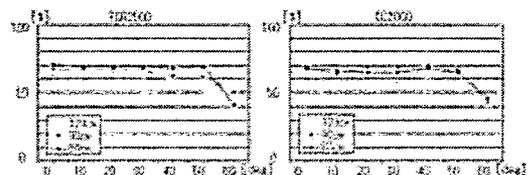


図60 白色光反射輝度

これら全てのグラフは θ が $60[\text{deg}]$ になったところで、輝度比が全体的に低下している。これは赤外光の実験と同様であり、再帰性反射材の角度に関する反射性能の限界が原因と考えられる。2種類のフィルムの輝度分布を距離、角度が等しい条件で比較してみると、条件によってはわずかにSC2000の方が輝度比が高くなっているが、ほぼ2つのフィルムに目立った違いはないとみてよい。FGR2500によるマーカを取り付けたスクリーンに映像を投影した写真を図61に示す。

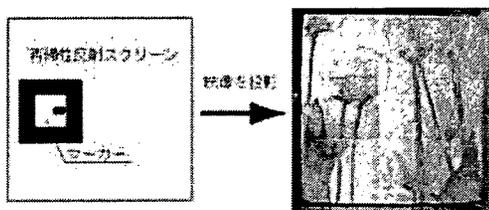


図61 赤外線方式による画像提示

最後に赤外線方式によって実際にマーカを認識しそれにもとづく3次元物体の提示が可能であるかを確認する。

図62で示されるシステムを構築して実験した。図中の立体スクリーンとは、表面に再帰性反射材を貼り付けた一辺25cmの発泡スチロール製の立方体である。なお、カメラは赤外光と輝度測定に使用したものと同様の赤外線カメラを使用した。

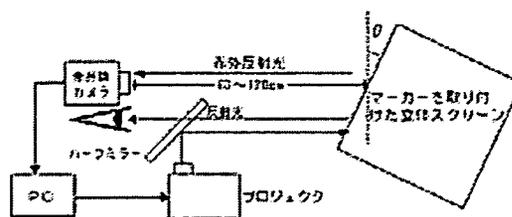


図62 赤外線方式実証システム

カメラとユーザの目の位置はごく近い物にし、カメラの光軸とハーフミラーで反射した投射光の光軸ができるだけ平行になるようにした。カメラとスクリーン間の距離を60cm以上に保ち、スクリーンを図の方向に回転、あるいはカメラ光軸に垂直な方向へ平行移動させるなどしてスクリーン中に提示された物体がどの角度までスクリーンの動きを追従するか確認した。

提示された3次元物体(青いポット)の様子を図63に示す。写真を図中の矢印のとおりに左から右へ、上から下に沿って見るとポットがスクリーンを追従している様子がわかる。カメラとスクリーン間の距離が $x=60\text{cm}$ 以上で回転角 θ が $10\sim 50[\text{deg}]$ までなら認識にほぼ成功し、青いポットが、あたかも立体スクリーン内部に存在しているかのように立体スクリーンの動きを追従した映像が提示された。

ただし、 θ が $0\sim 10[\text{deg}]$ 付近ではマーカ表面にハイライトが発生し、認識が不可能になることがあった。またスクリーン(マーカ)は静止している間にも、算出されたマーカ座標の小規模な変動が定期的な続くことがあった。

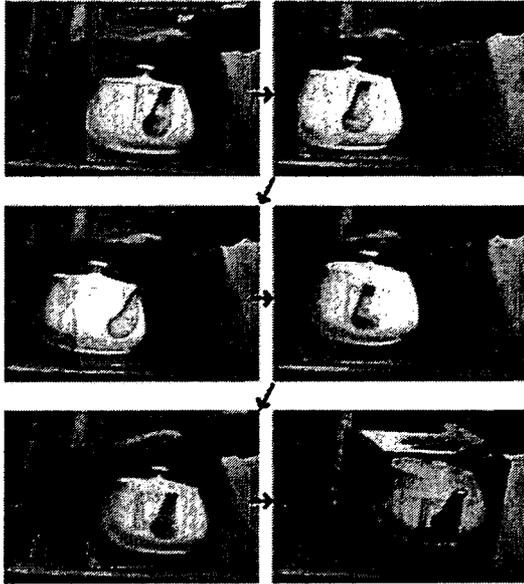


図 6 3 レジストレーション実証

C-5-3(2) 偏光方式の評価実験

本項では、偏光方式の実験について述べる。まず、使用した機材等についてのデータを以下にあげる。

- DMD プロジェクタ PLUSvision 製 型番 V-1080
- ビデオカメラからの映像は USB キャプチャユニット (USBCAP:アイオーデータ社製) で PC に取り込んだ
- 使用した再帰性反射材は、反射輝度が最も高いアルミ蒸着によるものである
- ハーフミラーはエドモンド社製の誘電体蒸着によるもので、45[deg]入射時に透過率 50% 反射率 50%
- スクリーンの撮影にはソニー製 DV の DCR-TRV900 を用いた

まず、再帰性反射材上に 1/4 波長板を固定して、実験用スクリーンを製作した。図 6 4 のような構成で、波長板の輝度差測定を行った。

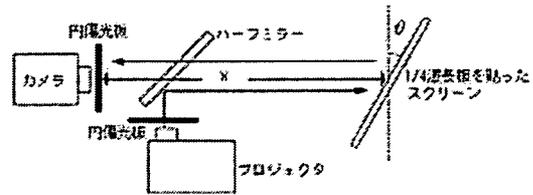


図 6 4 偏光方式の輝度測定実験

まずはマーカとなるべき、すなわち再帰性反射を阻害する能力について検証した。使用した円偏光板は左回りのものを用いた。PC で白色光(RGB 信号が全て 255)をプロジェクタに投影させ、白色光源とした。スクリーンの静止画をキャプチャし、スクリーン中央付近の輝度分布を調べ、赤外方式の実験と同様に波長板を貼った部分と貼らない部分の輝度比を計測した。(図 6 5)

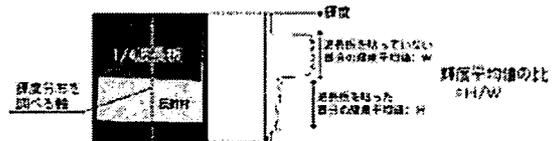


図 6 5 計測の軸

輝度比測定の実験結果を以下に示す(図 6 6)。比較しやすいように赤外方式の赤外光による結果(断熱フィルム FGR2500 による結果)も同一グラフ上に並べて示してある。

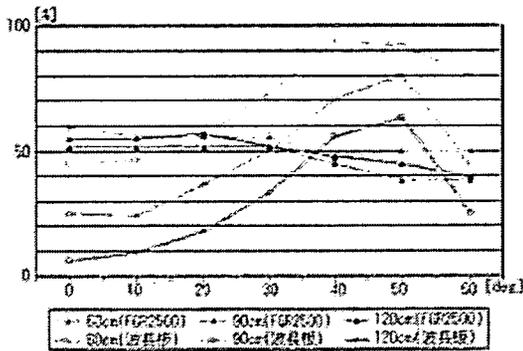


図 6 6 偏光方式の輝度測定結果

グラフを見ると、 θ が 20[deg]を超えなければ赤外方式に比較して輝度比が非常に小さいものが多い。波長板の部分の輝度は最小で 7%を下回る値をとっている。しかし、角度に関しては θ が 20[deg]を超えはじめると急激に輝度比が上昇している。これは波長板でずらす位相の値が入射角によって異なることによるものである。再帰性反射材の反射能力が急激に低下する角度より小さい角度で、波長板の輝度比が低下しているのは赤外方式と比較して大きな問題点である。実際には輝度比が低下している部分の波長板は青緑～黄色を呈していた。これは、入射角によっては一部の波長の光の位相が理論どおりに変化しないことが原因であると考えられる。

引き続きスクリーンとなるべき、すなわち再帰性反射をなす能力について検証した。図 6 4 の装置において、フィルムを貼ったスクリーンの代わりに波長板を貼ったスクリーンを用い、赤外方式の実験と同様に可視光（赤、緑、青、白の色）の反射光による各信号および輝度の比をグラフ化した。なお、本実験でキャプチャに使用したカメラはソニー製 DV の DCR-TRV900 である。

結果を図 6 7 に示す。比較しやすいよう

に赤外方式で用いたフィルム FGR2500 の結果と同一グラフ上に並べて示してある。赤外方式の断熱フィルムと比較すると、波長板は全ての色に渡って輝度比が高い。すなわち、色の再現性能が高いといえる。これは波長板が原理的には光の吸収を行わない性質を持つことに起因している。

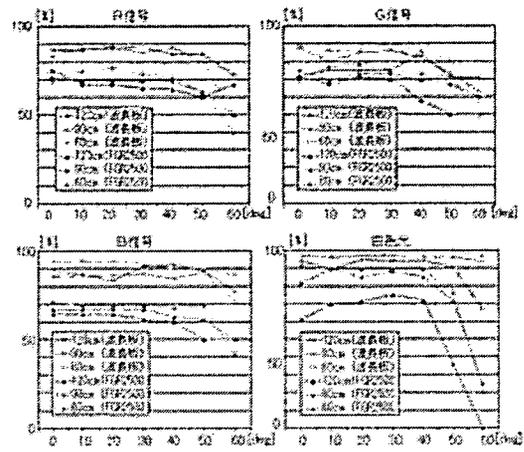


図 6 7 偏光方式の可視光の輝度

C-6 実世界とシームレスなポインティングデバイスの開発

C-6-1 投影の検証

指し棒の位置・姿勢・伸縮量情報に基づき、RPT システムが正しく投影を行えるかどうかの確認を行った。ポインタの位置・姿勢の取得には磁気式センサである Fastra を用いサンプリングレートは 120Hz とした。また、投影システムと再帰性反射材中心との距離を 120cm とした。トルソ型の実体型ディスプレイに投影されている様子を図 6 8 に示す。