



図 6 8 投影されている様子

C-6-2 ポインティングデバイスの検証

本システムでは、ポインティングデバイスが実体型ディスプレイの内部をポインティングしかつ内部の VR 物体に非接触の際、ポインティングデバイスはその先端と実体型ディスプレイ表面との距離を微小な一定距離に保ちつつ伸縮する。この機能について検証した。今回はポインティングデバイス先端と実体型ディスプレイ表面との距離を 2cm と設定した。その結果、表面に衝突せず追従することが確認された。しかし、時折伸縮量が振動する現象が見られた。また、本システムでは、ポインティングデバイスが実体型ディスプレイの内部の VR 物体に接触した際適切に力覚提示を行う。この機能を検証するために、実体型ディスプレイの内部にバーチャル平面を設定し、平面上をなぞる実験を行った。力覚提示の有効性を検証するため、バーチャル平面に常時ポインタを密着させながらポインタを平面に平行な方向に動かすというタスクを課し、力覚提示の有無でタスクの精度がどのような変化するか比較した。本実験では、

トルソ中心と視点との距離は 1200mm、バーチャル平面とトルソ中心との距離は 100mm とした。また、データのサンプリング回数は 10(回/s) であった。バーチャル平面はトルソからはみ出ない程度の有限の大きさとした。力覚提示無しの場合の結果を図 6 9 に、また力覚提示有りの場合の結果を図 7 0 に示す。

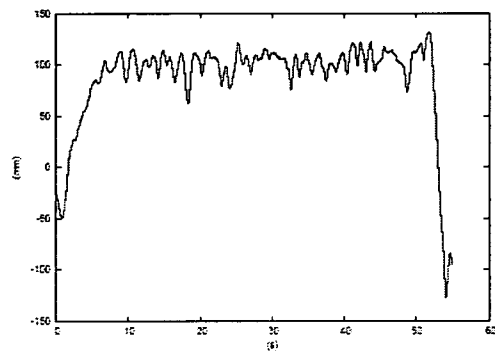


図 6 9 平面なぞり実験 (力覚提示無)

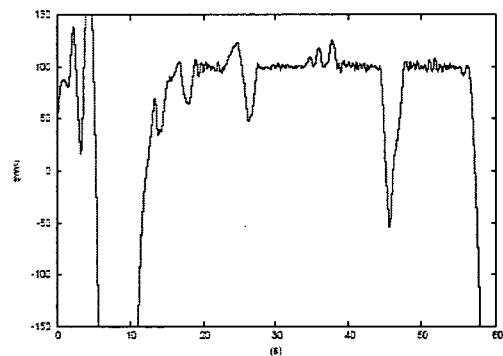


図 7 0 平面なぞり実験 (力覚提示有)

本実験ではポインタがバーチャル平面に接触していない状態から開始させたため、平面からの距離が最初に 0mm となった瞬間をポインティング開始時刻とし、また最後に 0mm となった瞬間をポインティング終了時刻と定義した。ただし、力覚提示有

りの場合において $t=0(s)$ から $t=5(s)$ までの間はバーチャル平面外において、バーチャル平面の位置よりも奥まで指せるかを確認しているためポインティング開始時刻は $t=5(s)$ 以降としている。このとき、非力覚提示時の標準偏差は 11mm、力覚提示時の標準偏差は 26mm であった。

C-7 視野外情報提示技術の開発

B-7の内容に基づき視野外情報提示システムを実装した。実装したシステムを図7-1に示す。再帰性反射材を貼付した物体(トルソあるいは人体に対応)の後ろ側にカメラを配置し、背景を撮影する。HMPの視点位置には視点カメラを取り付けている。使用した機材の緒元は以下の通りである

再帰性反射材

レフライト反射クロス8318 (レフライト株式会社)

プロジェクタ

- TDP-FF1A (東芝)
- 解像度: 800×600 (SVGA)
- 輝度: 400lx/15lm
- リフレッシュレート: 60Hz

カメラ

- FireflyMV (Point Grey Research)
- 解像度: 640×480 (VGA)
- リフレッシュレート: 30Hz
- インタフェース: IEEE 1394

PC

- ThinkPad T42 (IBM)
- CPU: Intel Pentium M 1.70GHz
- メモリ: 512MB

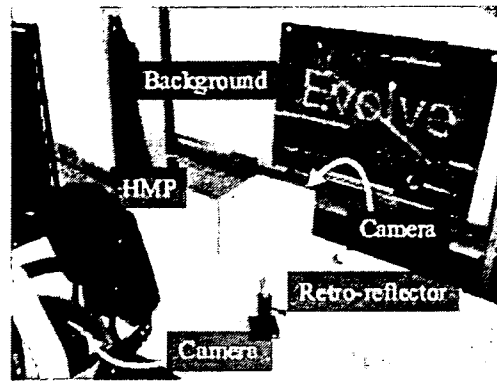


図7-1 視野外情報提示システム

B-7-3で提案した処理の流れに従い、視野外情報を遮蔽物体に投影する実験を行う。本実験では、まず背景カメラと視点カメラの画像を取得し、各カメラ画像に対してレンズ歪み補正を行う。続いて SIFT 特徴量に基づく対応点探索により両画像間の対応点を得る。そして得られた点から RANSAC アルゴリズムによって射影変換行列を算出し、背景カメラ画像を観察者視点の画像に変換する。これを HMP によって遮蔽物体に投影する。図7-2は、カメラ画像の取得から観察者視点映像を生成するまでの処理の結果である。SIFT 特徴量を用いた対応点探索により、大きく位置の異なるカメラの画像間においても、対応が概ね正確に取れていることがわかる。また、対応には誤対応が含まれているが、RANSAC アルゴリズムを適用することにより適切な射影変換行列が求められており、背景カメラ画像を射影変換した結果と視点カメラ画像の対応がよく一致している。

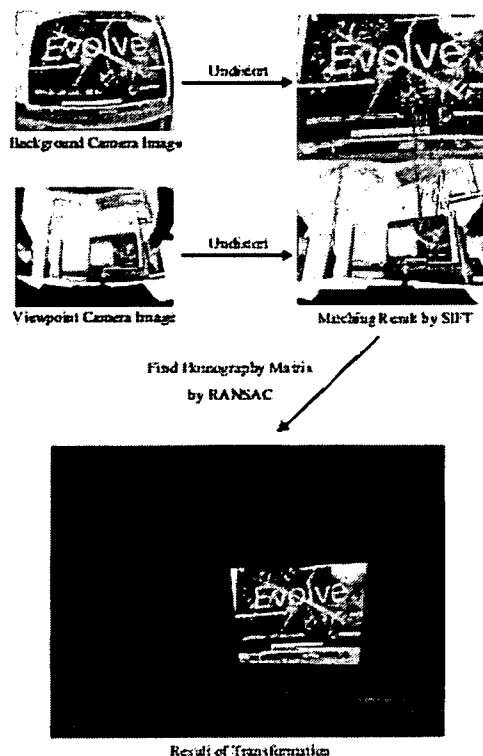


図 7 2 カメラ画像の取得から提示画像生成までの流れ

次に、生成された画像を遮蔽物体に投影した様子を図 7 3 に示す。背景の画像の交換が正しく行われ、適切な視野外情報の提示ができていることがわかる。この結果から、本手法を用いることにより回り込み動作が適用できるような環境では観察者の頭部の位置を測定せずに、観察者視点の映像を生成し、視野外情報を提示可能であることが示された。

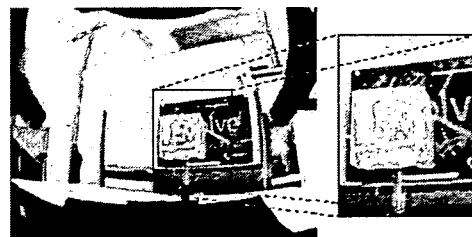


図 7 3 遮蔽物体に視野外情報を提示した様子

C-8 指先位置の取得と AR 映像の提示を同時に行う環境の構築

C-8-1 同軸照明-下部照明画像の分離

B-8 節で提唱した指先が再帰性反射材スクリーン上の内部にあっても外部にあっても指先の映像を取得できる機構として、本システムでは、半透明な机面の上方に赤外線ビデオカメラを固定し、ビデオカメラレンズの近傍に赤外同軸照明光源を、机面の下方に赤外下部照明光源を設置している。この 2 種類の照明に時分割制御を行うことで、両者の画像が分離できることを確認する。

ビデオカメラの NTSC コンポジットビデオ信号出力を照明制御回路に入力し、出力信号で赤外照明を制御させた。一方でビデオカメラの DV 出力を PC に入力し、C++ と DirectX で作成したビデオキャプチャソフトウェアで観測した。ビデオキャプチャソフトウェアは、ビデオカメラで撮影されたソース映像をディスプレイに表示するとともに、ソース画像の ODD フィールドと EVEN フィールドを分離し (図 7 4)、各フィールドの映像も同時に表示する。

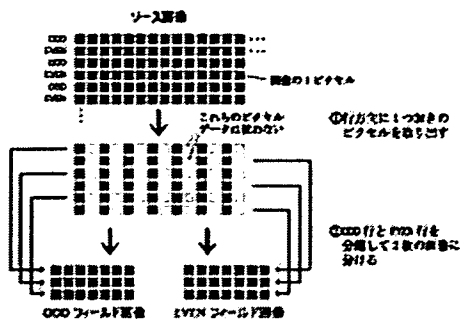


図74 ソフトウェアによる
ODD画像・EVEN画像の
分離アルゴリズム

試作機を用いて、ディスプレイの各フィールドの分離映像を確認しながら PC 照明制御回路を調節した結果、2 フィールドの映像を高コントラストで分離することができた (図75-図77)。

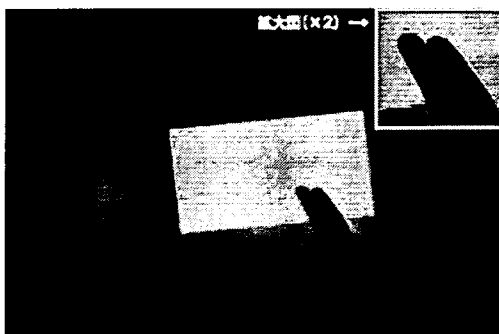


図75 取得されたビデオ映像の
1フレームおよび一部を拡大した画像

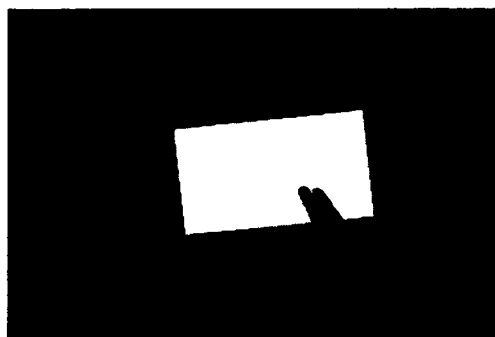


図76 分離された同軸照明画像

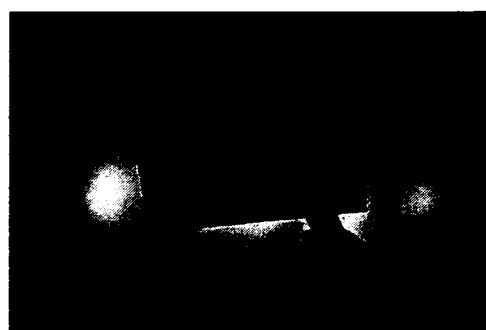


図77 分離された下方照明画像

C-8-2 再帰性反射材の位置・姿勢計測

B-8-2節で示したアルゴリズムで再帰性反射材の位置・姿勢を推定するためには、再帰性反射材の角の座標を、机面に対してカメラのレンズ位置を中心に射影した2次元座標が必要となる。ここでは、得られた同軸照明画像から再帰性反射材の角の2次元座標を求めるために、次に示すような処理を行った。なお実装には OpenCV を用いた。

- (1) `cvCvtColor` 関数で8ビットフルカラーから8ビットグレースケールに変換する。
- (2) `cvCanny` 関数でエッジ抽出を行う。
- (3) `cvHoughLines2` 関数でハフ変換を行い、再帰性反射材の各辺の直線のパラメタを求める。

- (4) 求めた直線をパラメタによってグループ化し、属する直線の多かった上位 4 グループを再帰性反射材スクリーンの辺とする。
- (5) 4 辺の交点を求め、再帰性反射材の角の座標を求める。
- (6) 新しく求めた座標を一つ前のフレームで求めた座標と比較し、頂点の対応付けを行う。
- (7) カメラの画角パラメタを用いて、画像内の座標系からワールド座標系へ座標変換する。

本試作システムを用いて、再帰性反射材の位置および姿勢を実際に検出した。前述のアルゴリズムに基づいて求めた、再帰性反射材の 4 頂点のうち 3 頂点の z 座標の推定結果を図 7 8 に示す。

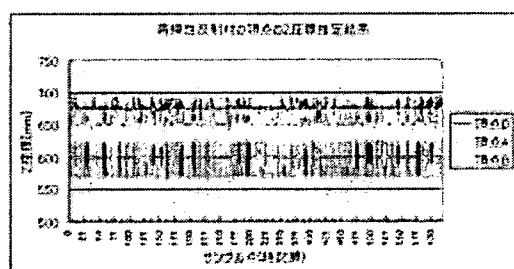


図 7 8 再帰性反射材の位置姿勢推定精度 (改善前)

どの頂点も真の値は 690[mm]である。ほぼ正確に z 座標が取れている頂点もあるが、100[mm]以上の振れ幅で 2 値間を動いている頂点もあり、推定精度に問題がある。そこで z 座標の推定計算を多重に行うようアルゴリズムを改良した結果、推定結果は図 7 9 に示すように大きく改善された。さらに時間方向のフィルタを掛けることで安定

性が増すことも確認された。

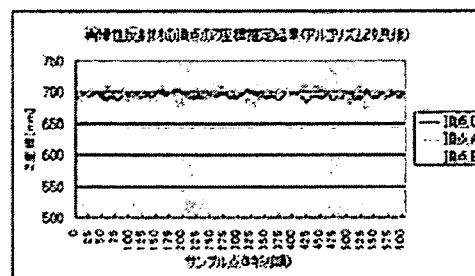


図 7 9 再帰性反射材の位置姿勢推定精度 (改善後)

C-8-3 ユーザの指先位置・姿勢計測

B-8-3 節で説明したように、指先位置は同軸照明画像 (図 8 0) と下部照明画像 (図 8 3) のどちらかから検出される。指先位置を検出するために、両画像に対して次に示すような処理を行った。

- (1) cvCvtColor 関数で 8 ビットフルカラーから 8 ビットグレースケールに変換する。
- (2) cvCanny 関数でエッジ抽出を行う (同軸照明画像 : 図 8 1), 下部照明画像 : 図 8 4)。
- (3) (2) で得られた画像に対して、画像上方から指先の形状のビットパターンでスキャンし、指先の候補点を得る。
- (4) 同軸照明画像内に指先候補点が見つかった場合はそれを指先位置とする (図 8 2)。
- (5) 同軸照明画像内に指先候補点が見つからなかった場合は下部照明画像内の候補点を指先位置とする (図 8 5)。
- (6) 同軸照明画像、下部照明画像のどちらにも指先候補点が見つからなかった場合は、画面内に指先は存在しないと

判断する。

実際に指先位置の検出を行ったところ、指先が再帰性反射材上にある場合とない場合どちらにおいても指先位置を検出することが検証された。

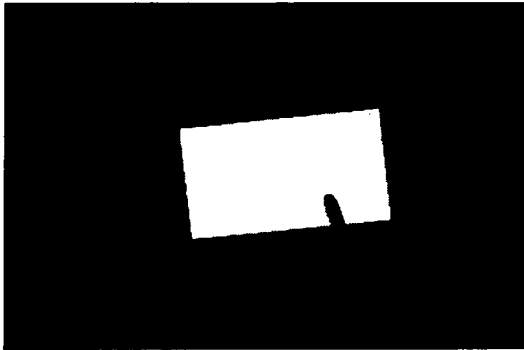


図 8 0 同軸照明で再帰性反射材を撮影した画像（同軸照明画像）

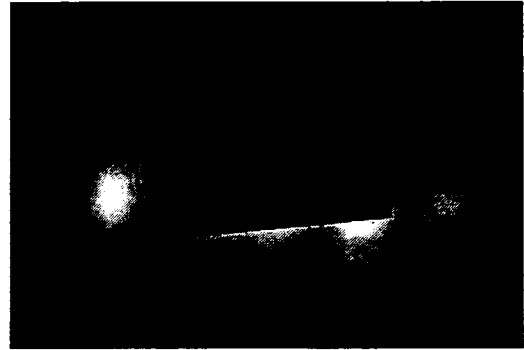


図 8 3 下部照明で再帰性反射材を撮影した画像（下部照明画像）

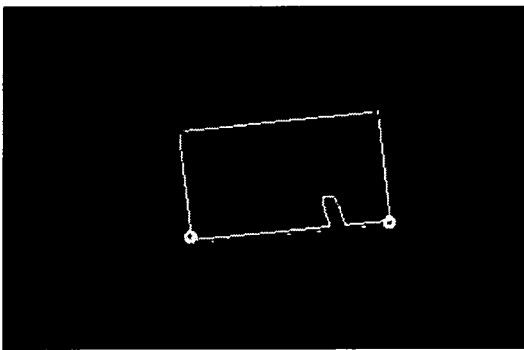


図 8 1 同軸照明画像に対してエッジ抽出を行った画像

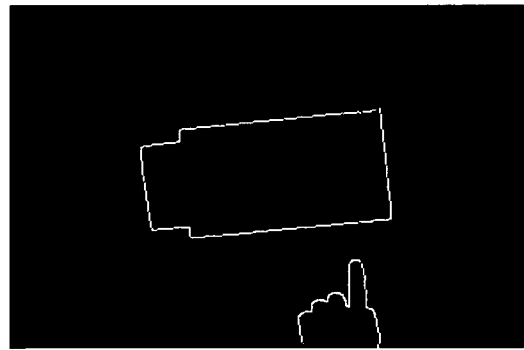


図 8 4 下部照明画像に対してエッジ抽出を行った画像

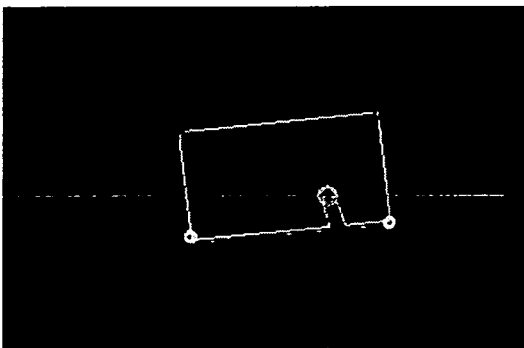


図 8 2 図 8 1 に対して指先パターン検出を行った画像

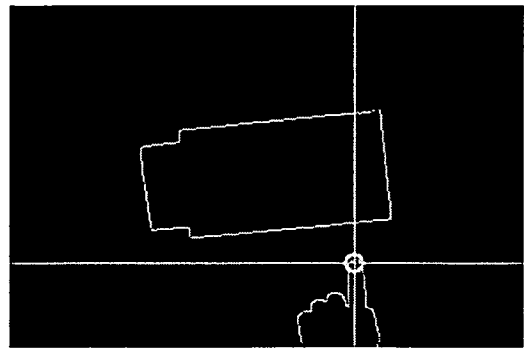


図 8 5 図 8 4 に対して指先パターン検出を行った画像

C-9 X'tal Scope システムの構築

B-3-1, B-3-2 の内容に基づき X'tal Scope システムを実装した。改良後の緒元を表 3 にまとめる。また、実装されたシステムを用いてトルソに骨格を投影された様子を図 8 6 に示す。

表 3 X'tal Scope 緒元

頭部可動範囲	140x140x45[cm]
頭部ピッチ角	+60 ~ -90[deg]
水平画角	30[deg]
垂直画角	22[deg]



図 8 6 骨格モデルの投影

本手法の最大の特徴は両眼立体視ができる点である。両眼立体視においてクロストーク（左目に右目用の画像が入り、右目に左目用の画像が入る現象）の有無は自然な立体視に大きな影響を及ぼす。そこでクロストークが生じていないかどうかの評価を行った。

左右の目にそれぞれ“L”、“R”の文字を提示した写真を図 8 7 に示す。左目には“L”、右目には“R”の文字しか見えておらず、クロストークがほとんど生じていないことが確認できる。これによって、本手法を用いて自然な立体視が可能であることが示された。

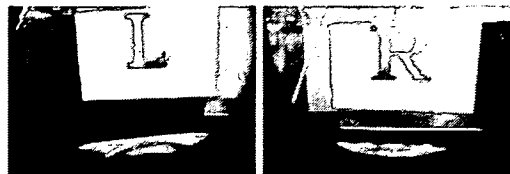


図 8 7 クロストークの評価

C-10 X'tal Visor システムの改良

前章で論じられた視野角改善のための手法について本章で検討を行う。検討を行うためのベースとする X'tal Visor 光学系のパラメータ等を、試作機を基に以下のとおり設定する。

画像素子は 0.7 型 (14.224[mm] x10.668[mm]:対角 17.78[mm])とし投影レンズはアロマティックレンズの平均的な値として焦点距離 30[mm]、EFL-BFL=8[mm] (有効焦点距離-バックフォーカス)、とし、厳密な議論を要する部分では実パラメータを用いるとする。レンズホルダは開口径 22[mm]、ホルダ径 30[mm]とし、眼とミラー間の距離は 20[mm]と設定する。

C-10-1 レンズホルダ部の小型化

図 2 からケラレの問題を解消するにはレンズホルダの端面とレンズ表面の距離を可能な限り短くするなどのレンズホルダの小型化が一義的な改良方法である。ただし、レンズ径の小型化は投影視野角の減少を意味する。

改良前の FEL=17[mm](フランジバック)は 17[mm]である。これを仮に 0[mm]とすると実視野は 42[deg]と大きく改善される。また、本手法によって改悪する要素は皆無である。以降は、実際的な値として FEL=2[mm]まで本改良がなされており、さ

らなる改良を行うとの前提で以降の議論を行う。

C-10-2 レンズ・画像素子の大型化

図88に示すようにレンズ・画像素子の径の大型化によって投影視野角は改善される。

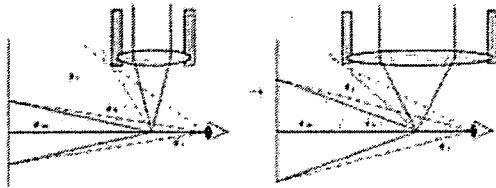


図88 レンズ・画像素子の大型化

本改良の例として投影レンズ-ミラー間の距離（焦点距離に等しい）を変えず、水平視野角の目標として45[deg]を設定すると、レンズの有効径は31.7[mm]以上、画像素子は26[mm]x20[mm]以上である必要がある。実際的な値としてレンズ径を40[mm]とするとケラレは生じないが、実視野角は45.8[deg]x34.5[deg]となる。この際、眼とミラー間の距離は25[mm]となり、輝度の低下の問題が生じる。また、装置全体の大型化・重量化などの問題も生じる。

C-10-3 レンズの短焦点化

図89に示すようにレンズの曲率を増すなどの短焦点化によって投影視野角は改善される。

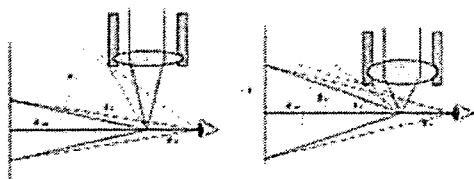


図89 レンズの短焦点化

本改良の例として水平視野角の目標とし

て45[deg]を設定すると、投影レンズの焦点距離は17.2[mm]となる。一般に径が大きく焦点距離の小さいレンズでは収差の少ないものの製作が困難である。また、レンズの厚みによりミラーとの干渉が生じる場合がある。また、実際的な値として口径25[mm]、焦点距離25[mm]の平凸レンズを例に計算すると、実視野は31.5[deg]x23.6[deg]となる。

C-10-4 球面ミラーの利用

図90に示すように平面ミラーの代わりに球面ミラー（たとえば凸面鏡）を用いることで投影視野角は改善される。

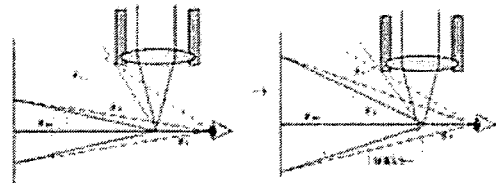


図90 球面ミラーの利用

前節と同様、水平視野角の目標として45[deg]を設定すると、ミラーの曲率半径 r [mm]、投影レンズ-曲面ミラー間距離 d [mm]の間に

$$d=0.55r+30$$

の関係が成立する。一例としてミラーの曲率半径 w を20[mm]、投影レンズ-曲面ミラー間距離を41.1[mm]とすることができる。この際の球面ミラーの大きさは11.1[mm]となり、これは球面ミラーによる視野の障害が問題となる大きさである。また、球面ミラーでは非点収差が大きな問題となる。本光学系で用いる画像素子の解像度を800x600とすると、許容錯乱円径は0.01778[mm]と算出されるが、本光学系に設定されているパラメータを基に算出する

と2点の像のずれは2.21[mm]となり、問題外の大きさのボケが発生することがわかり、本方式はこのままでは実現不能である。

C-10-5 レンズ系(複数レンズ)による短焦点化

図91に示すように投影レンズを複数連続して用いることにより、合成焦点距離が短くなる。また、光線が集まる位置が投影光学系に近くなり、投影視野角が改善される。また、2枚目以降のレンズは小さくしてすむので実視野角の改善も期待される。

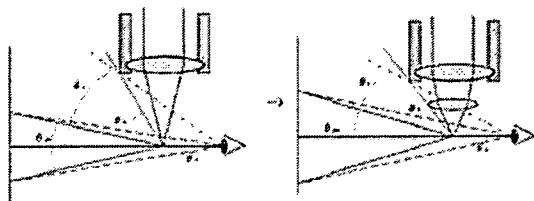


図91 レンズ系による短焦点化(レンズ2枚の例)

例として投影レンズを2枚用いて光学系の短焦点化を行う場合を考える。シミュレーションの一例として1枚目の投影レンズの焦点距離を35[mm]、2枚目の投影レンズの焦点距離を20[mm]、2枚のレンズの主点間距離を15[mm]とすると、2枚目のレンズの必要有効径は10.2[mm]となり、実際的な値として2枚目のレンズホルダの径を15[mm]、2枚目のレンズの主点からレンズホルダ端の距離を5[mm]とすることでケラレの生じない設計が可能である。この場合の実視野角は44.7[deg]x33.5[deg]となる。

C-10-6 グリンレンズを用いた光路延長

レンズ・ミラー間を広げるとレンズの焦点距離 f が大きくなることにより、光線の

集まる角度が小さくなってしまう。そこでレンズの焦点距離は変えずにレンズ・ミラー間の距離を広げようなりレー光学系を挿入する手法を提案する。そのような光学系としてグリンレンズ (GRIN lens = Gradient Index lens) を用いている (図92)。

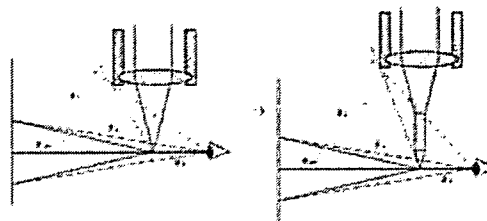


図92 グリンレンズを用いた光路延長

りレー光学系としてグリンレンズを選択した理由は取り扱い、設計の容易さ、非常に小型である点などが上げられる。実際的なシミュレーションの一例としてΦ2.5[mm]長さ6.5[mm]のグリンレンズを用いた。これは既存のグリンレンズの中から目前已配置されても気になりにくいことを考慮し選択したものである。

グリンレンズの問題点は画角(相当)の狭さであり今回上記のグリンレンズの画角を実測した結果、10.9[deg]であった。この値を基に算出した結果、実視野角は6.30[deg]x8.40[deg]となった。

実際にはグリンレンズにより、上方19.5[deg]～29.8[deg]の部分の水平3.58[deg]相当の実視野が阻害されることになるが、これは小さく、またレンズは透明であり細い、眼との距離が短いため眼の調節に合焦が不可能などの理由でそれほど邪魔にはならないと考得られる。また、実際に試作した結果、主観的ではあるが、それ

ほど邪魔にはならなかった。

D. 考察

D-1, D-2 節は前節との整合性をとるため欠節とします。

D-3 焦点深度と輝度の確保・補正の両立

RPTにおける投影画像の品質を改善するために、スクリーン輝度と焦点深度の両立という観点から、プロジェクタ系に可変のアイリス絞りを追加した光学系の提案を行い、有効であることを確認した。今後は、動的にスクリーン距離や形状が変化する場合への対応、前報での提示画像補正による輝度補正との併用を行い、さらなる品質向上を目指す。

D-4 RPTを用いた視覚提示系の心理物理学的検証

D-4-i 融像可能範囲に関する検証実験

スクリーンの大きさに関して、被験者ごとの結果を見比べると、遠方の融像限界はどの被験者も5~10[deg]程度であり差がないのに対し、近方の融像限界は被験者によってかなりの差が見られる。これは、スクリーンから近方に飛び出して見える立体像を見る場合、立体視に慣れた被験者は像の移動にあわせて寄り目をして、かなり近くの物体まで融像することができるのに対し、立体視に慣れていない被験者は寄り目をして融像することができないためだと考えられる。

また、遠方の融像限界は被験者ごとの値のばらつきが小さいのに対し、近方の融像限界は同じ被験者でもかなり値にばらつき

が出ている。これは、近くの物体を見ようとするとき眼筋を使って寄り目をするため、実験がすすむと疲労が蓄積されて近くが見えなく場合があるためと考えられる。

スクリーンとの距離に関しては、スクリーンまでの奥行距離が小さくなるほど、近方融像限界も遠方融像限界も観察者にとって近い位置になる傾向が見られる。つまり、観察者に近いスクリーンでは近方の提示物体を融像しやすいが遠方の提示物体は融像しにくい。逆に、観察者から遠いスクリーンでは遠方の提示物体を融像しやすいが近方の提示物体は融像しにくいといえる。これはスクリーン面の位置から生じる調節反応と提示される物体に対する両眼視差・輻輳の反応とに齟齬が生じるので、スクリーンから奥行距離の離れた提示物体は融像しにくいためだと考えられる。

Nagata らによる過去の知見によると融像可能範囲は提示面の位置に影響されないが本実験では上述のように融像可能範囲がスクリーン位置に影響を受けている。この違いの原因として、まず、提示面（スクリーン面）の位置の違いが考えられる。提示面（スクリーン面）の位置が過去の知見では数[m]であるのに対し、本実験では1[m]以内である。よって、スクリーン面が観察者により近い場合、調節反応の影響が大きくなったと考えられる。また、過去の知見では被験者は提示画面のみを見ることができたのに対し、本実験では画像提示が行われるスクリーン面の周囲に実環境を見ることができた。このため、スクリーンの端部による画枠効果が強く表れていると考えられる。

提示物体の大きさに関して、どの被験者においても提示物体の大きさが大きいほど融像可能範囲が広がっていることが分かる。これは以下のように説明することができる。提示物体の大きさが小さいとき、視差の手がかりとなる提示物体のエッジは視野の中心付近に存在する。これに対して提示物体の大きさが大きいときは、視差の手がかりとなる提示物体のエッジは視野の周辺部に多く存在する。ここで Panum の融合域が周辺視野で広がることにより、提示物体が大きいほど融像が可能となる範囲が広くなるといえる。

D-4-2 奥行き知覚に関する検証実験

実験結果より、全ての被験者のほぼすべての試行において奥行知覚誤差が 5[cm]以内となっている。

正確な奥行知覚を達成するためには当然融像可能範囲が広く、提示物体の融像が容易となるシステムを構築する必要があるといえる。しかし、本実験の条件下では全ての被験者のほぼ全ての条件で、提示物体の調整位置の平均値と実物体の奥行距離と距離の誤差が 10[cm]以内であり提示物体の奥行距離を知覚できている。このことは RPT による視覚提示が奥行きの提示を正確に行えていることを実証している。

D-4-3 大きさ知覚に関する検証実験

実験結果より、提示物体までの距離が大きい場合は知覚された実物体の大きさが大きく、距離が小さい場合は知覚された大きさが小さくなる傾向が全ての試行に対して見られる。これは、スクリーンの手前では

提示物体の大きさが大きく知覚され、スクリーンの後方では提示物体の大きさが小さく知覚されているといえる。この結果は Nagata らによる過去の知見と一致する。

また、スクリーン配置が異なる場合の知覚される大きさの違いは、奥行 50[cm]の位置で 10[%]以下、奥行 100[cm]の位置で 20[%]以下である。

以上は、RPT による視覚提示が大きさの提示を正確に行えることを実証している。

RPTの実現において極めた重要なレジストレーションを、画像提示部分にスクリーンとマーカの機能を同時に持たせ(1)人間の眼に対してはスクリーンとして、(2)画像認識機器に対してはマーカとして、機能するようシステムを構成する手法として赤外線方式と偏光方式を提案し、それぞれの有用性を検証した。この検証過程を通して明らかとなったいくつかの問題について以下の考察する。

D-5 スクリーン機能と3次元位置計測用のマーカ機能の両立

D-5-1 フィルム性能の比較と閾値の決定の必要性

今回画像認識においては、まず始めに得られた画像中の輝度信号と一定の閾値を比較し、閾値より高い画像を白(RGB 信号で(255,255,255))に、低い画像を黒(RGB 信号で(0,0,0))に変換する。そこから得られた画像を元に認識を行うので、フィルムを貼った部分と、貼らない部分の輝度分布が入射角・カメラ・スクリーン角に依存しなければ認識を常に行うことが可能になる。しかし、実際には再帰性反射材は入射角が大きくな

ると再帰性反射能力が低下する。また、再帰性反射率の値は入射角・カメラ・スクリーン距離によって極力変化しないことが望ましいが、フィルムの反射率、透過率は一般にはそれらのパラメータに依存する。以上の議論から、前述した2種類のフィルムによって得られる輝度分布を入射角・距離ごとに調べ比較し、またそれに基づく理想的な閾値を求める必要がある。

D-5-2 輝度信号測定実験の考察

断熱フィルム2種類についての以上の実験結果から、FGR2500を用いて輝度信号の2値化の閾値を125~150程度の値にしておけばマーカ認識が0[deg]~40[deg],0[deg]~50[deg]なら認識が可能であることが判明した。認識可能な最大角を60[deg]以上にするには、120cm以上カメラとスクリーンの距離を置く必要があると考えられる。これらの角度は立体にマーカを複数つけて用いることを前提として考えれば、十分な角度であり実用に耐えうる。前述したように赤外照明が厳密にはカメラと共役点にはなっていないのが原因であり、より赤外照明とカメラの距離を小さくするなどの対策が必要である。SC2000の方は可視光域においてはFGR2500より透過率が高く、色再現性の性能はやや高い反面赤外光における吸収率が低く認識目的には実用的ではない。

D-5-3 最適な輝度信号値への変換法

今回我々は画像認識において、画像中のRGB信号をYIQ変換を用いて変換した輝度信号の値で2値化を行った。これは人間の感度特性に合わせて定義された変換で

ある。しかし、実験に用いた赤外線カメラは輝度が高い部分は白く、輝度の低い部分は緑色に近い色になる。これは、カメラの特性によるものであり、YIQ変換による輝度信号より緑の補色に近い赤色を担うR信号を基準に2値化を行ったほうがコントラストを高くとることが可能である。また偏光方式の波長板についても、実験結果からスクリーン角度が20[deg]を越えたあたりから波長板の部分が一部の波長の光をキャンセルしきれずに黄色くなってしまい実用上問題になるほどコントラストが下がっている。これも、黄色の補色である紫に近い色を担うB信号についての2値化を行うと、コントラストを高く取ることが可能である。

以上の議論から、マーカの方式やカメラ特性に合わせた変換法を用いれば、YIQ変換を用いる認識より、より広範囲での認識率の向上が望める可能性がある。

D-5-4 偏光方式：波長板マーカについて

実験結果や前述した考察から、条件によっては非常に高いコントラストを達成でき、また赤外方式より可視光の再現性能が高いという優れた特長をもつことがわかった。しかし、偏光方式には以下のような問題がある。

まず、検出光が可視光であるため、無関係な外光からの影響を受けやすい点である。

これを防ぐには、外光より強力な光源を用いる必要であるが今回のように単純な光源としてプロジェクタを一台使用してしまうのは実用的ではない。また、使用する波長板によってはハイライトが発生し、認識に障害が生じるという問題もある。さらに、

今回のシステムでは検出用の光源をカメラの近くに置いている。これはすなわち、ユーザの目のそばを光源から出た検出光が通過することになる。眼に高輝度な検出光が入るとユーザは眩しくなり、映像も見づらくなるという問題が生じる。回避策としてはカメラおよび光源を眼から離せばよいが、カメラとユーザの眼を離すとスクリーンへの提示物体の位置合わせが不正確になることがわかっている。これを解決するには赤外線を用いた偏光方式を用いること、などが挙げられる。

D-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

D-6-1 投影の検証

投影実験から、ポインティングデバイスの位置が正しく認識され、正しい位置に投影されていることが確認できた。また、これによりリアルな空間とバーチャルな空間とのシームレスなポインタの移動が可能であることが確認された。

D-6-2 実体型ディスプレイ表面への追従

実体型ディスプレイ表面への追従実験では、ポインティングデバイスが複雑な表面形状に対して追従して動作していることが確認された。しかし、先端が表面に触れることはなかったが時折先端位置が振動していることも確認された。これは、変動する摩擦が原因の可能性がある。また、デバイスと反射材表面とのなす角によって間隔の変動が見られた。これは、距離測定のための PSD センサがデバイスの中心軸から 15mm ほど離れた位置にあるためと考えられる。この問題を解決するには、デバイ

スの中心軸と PSD センサの中心軸を一致させる必要がある。しかし、デバイス先端には接触対象の表面保護のために直径 10mm の球が装着されており、このために上記の位置に PSD センサを持つことは困難である。そこで、他の方法としてはこの表面保護用球体自体を距離センサの一部にする方法が考えられる。すなわち、球体とデバイスとをばね定数の小さなばねにより連結し、この球体とデバイスとの距離を計測することで前述の問題は解決できる。しかし、ばね定数が小さいと球体の表面への追従性が悪化し、逆にばね定数が大きいと非力覚提示状態でも力を感じてしまうためこの方法は適切ではない。他に考えられるのは、センサの形状を球形とすることにより、センサ自身をデバイス接触時の表面保護用に用いることである。このためにはセンサと表面の距離が 0 でも計測できるセンサを用いる必要があるため、利用可能なセンサは限られる。利用可能な例としては金属センサがある。ディスプレイ部の内部または裏側に金属膜・金属板を配置することにより、その金属までの距離、すなわちディスプレイ表面までの距離を金属センサにより計測することが可能となる。

実体型ディスプレイの再帰性反射材の内側に、アルミ箔を張り、アルミ-再帰性際の 2層構造とすることで、金属センサを用いたディスプレイ表面への接近検知センサを構成可能である。この金属センサはサーチコイルと発振回路から構成される。サーチコイルに交流電流を流すと、近傍にある金属に渦電流が流れる。このとき、この渦電流は反作用磁束を発生する方向に流れるため、サーチコイルの起電力を変化させる。この

起電力は近傍の金属の種類・距離・面積・体積のそれぞれに依存するため、これを検知することによりセンサから金属までのおおまかな距離を測定することが可能となる。

この原理を利用して図9-3に示す回路と、図9-4に示すサーチコイルを用いて、実際に距離を計測して非接触状態と接触状態とを制御できることを確認した。

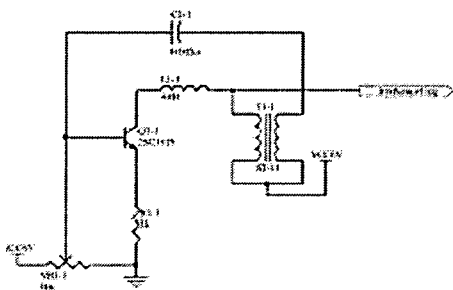


図9-3 コイルを用いた距離センサ回路図

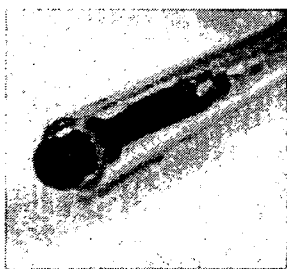


図9-4 実装したサーチコイル

現時点における本センサの問題点としては、センサ出力が周波数であるために F/V 変換の際に遅れが生じ、距離制御用には適していないことと、再帰性反射材を金属で裏打ちすることにより Polhemus センサなどの磁場を用いたシステムとの共存が難しいことが挙げられる。

D-6-3 ポインティングの奥行き精度と力覚提示の有無

非力覚提示時は、常に奥行き方向のポインティング位置が不安定であるのに対し、力覚提示時における位置は図1-8で示されるように安定してポインティングできている状態と不安定な状態に分かれている。現時点において、アクチュエータの構成要素であるプーリとワイヤとの間で間欠的にすべりが発生することが確認されており、このすべりが発生しているときに不安定な状態となっている。この問題は機構的な問題で設計の改良で改善される。

次に、力覚提示時に安定してポインティングできているときの標準偏差と、力覚提示無しの際の標準偏差を比較すると力覚提示時は 2.9mm、非力覚提示時は 11mm であった。このことから、常時安定した状態にすることができれば力覚提示を行うことによるポインティングにおける優位性は明らかだと言える。

D-7 視野外情報提示技術の開発

本手法の問題点として、処理速度の遅さが挙げられる。現状では射影変換行列の算出のループ速度が 1fps 程度であるため、観察者が移動してから画像が更新されるまで 1 秒ほどの遅れが生じてしまう。観察者が自由に移動しながら提示画像を観察するためには少なくとも 10fps 程度の処理速度が必要である。処理速度の高速化は、画像処理部分を GPU を用いてハードウェア化することで実現可能であると考えられる。今後の課題として、処理速度の向上に加え、背景カメラを複数台にして、どの方向からでも視野外情報を観察可能にすること、複数人に対応した提示システムを構築することなどが挙げられる。

今後は、カメラの取り付け位置や HMP のレンズ歪みなど様々な要素を考慮に入れたキャリブレーション機構を構築する必要があると考えられる。さらに、ステレオマッチングの精度や速度の向上も課題として挙げられる。

D-8 指先位置の取得と AR 映像の提示を同時に行う環境の構築

D-8-1 同軸照明-下部照明画像の分離

本システムで用いる指先位置検出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、赤外線ビデオカメラのフレーム切り替えもしくはフィールド切り替えと同期しなければならない（図 9 5）。

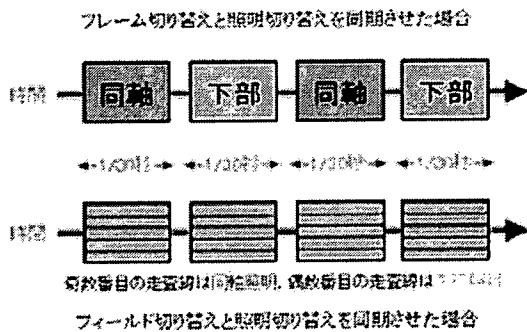


図 9 5 フレーム切り替え同期とフィールド切り替え同期の違い

NTSC 映像信号では、1/30 秒ごとに 1 フレームの画像データが送られる。しかし実際には、最初の 1/60 秒にフレームの半分、奇数番目の走査線の画像が転送され、次の 1/60 秒に偶数番目の走査線の画像が転送される。この 1/60 秒ごとの半フレームの画像データをフィールドと呼び、1 フレームは 2

フィールドで構成される。フレーム切り替え同期とフィールド切り替え同期の長所・短所は次の通りである。

- フレーム切り替え同期では、フレーム切り替えごとに同軸照明・下部照明が切り替わった画像が得られるので、NTSC 出力されたビデオ映像をフレームに分解してそのまま使用することができる。しかし、フレームレートが通常の半分の 15FPS に落ちる上、PC の画像処理段階でフレーム落ちが起こった場合、どちらかの照明条件の画像だけが連続して得られてしまう可能性がある。
- フィールド切り替え同期では、1 フレーム内の奇数番目走査線・偶数番目走査線にそれぞれ同軸照明・下部照明の画像が分割され、組み合わせられた形で出力される。そのため、PC で画像処理を行う際にそれらを別々の画像に分解する必要がある。しかし、画像は 30FPS で得られ、フレーム落ちが起きても安定して 2 種類の照明条件の映像を得る事ができる。

本システムでは以上の点を踏まえた上で安定性の高さを重要視し、フィールド切り替え同期方式を選択した。

D-8-2 再帰性反射材の位置・姿勢計測

再帰性反射材の位置姿勢を推定する場合には、誤差の要因となりうる主な点を次に列挙する。

- (1) 赤外線ビデオカメラでの撮影時、もしくはエッジ抽出に伴う 2 値化時に生じるピクセル量子化誤差
- (2) 再帰性反射材のエッジ画像のノイ

ズに起因する、各辺のパラメタ推定誤差

(3) 反復計算時の増分 Δz が十分に小さくないことによる誤差

(1)のピクセル量子化誤差は、最大で画像処理に使用する画像 1 ピクセル分の大きさとなる。試作機では、画像処理に 360 ピクセル×240 ピクセルの画像を使用している。

再帰性反射材が画面中央付近にあるとき、ピクセル量子化誤差は再帰性反射材が遠いほど強く効く。このため、再帰性反射材が机面に置かれているときに推測結果が受ける影響が、ピクセル量子化誤差の最大値だと言える。試作機に使用した赤外線ビデオカメラのに映る範囲は、机面（レンズからの距離 850mm）において横方向 630mm である。これが 360 ピクセルに相当するから、単純に計算すると画像の 1 ピクセルは机面での 1.75mm にあたる。再帰性反射材の一边の長さに 1 ピクセル分の誤差が乗ると、Z 軸方向の推定座標値に図 9 6 に示すような大きな誤差が生ずる。

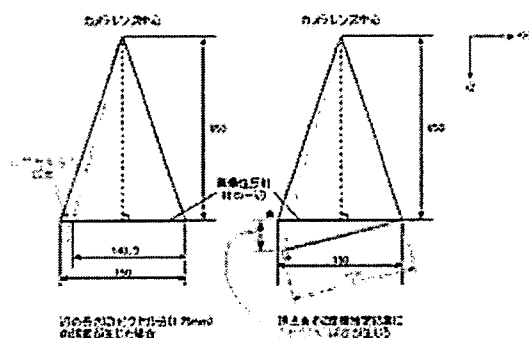


図 9 6 ピクセル量子化誤差の影響

仮に再帰性反射材の辺の長さを 150mm としたとき、1.75mm の誤差が乗ると、推定結果の頂点は x 軸の正方向（右向き）に 1.15mm、z 軸の正方向（下向き）に 13.4mm

ずれる。

(2)のパラメタ推定誤差も、画像処理をする前の段階でピクセル単位のずれとして現れるため、誤差のオーダーは(1)と同様である。

(3)の反復計算時の差分 Δz に関して、示した頂点座標推定のアルゴリズムでは、一つの頂点の z 座標を Δz 刻みで変化させる。このため、z 座標の精度は Δz のオーダーに依存する。

頂点座標推定実験の結果、真の値に近い値を安定して取得できる場合と、非常にばらつきの大きい値が得られてしまう場合があることが明らかになった。とくに頂点 A についてはばらつきの幅も 120mm 前後と大きく、値はほぼ 2 極化していた。このことから、頂点 A の z 座標値については、何らかの誤った解（ただし、机面に射影をすると真の解と非常に似ている）が存在し、誤差要因(1)や(2)の影響でどちらかの解がランダムに現れていると考えられる。

以下、誤った解を排除するための対策を挙げる。(1)現在は、頂点 C の座標を頂点 D、A、B の座標値から機械的に計算しているが、頂点 B、C、D についても頂点 D、A、B と同様のアルゴリズムで頂点推定を行い、解の自由度を減らす。(2)現在は OpenCV の Hough 関数を使用している再帰性反射材の辺の検出に、より適した手法を探す。(3)赤外線ビデオカメラの解像度を上げる、もしくは赤外線ビデオカメラを机面に近づけるかレンズをズームして、解像度を相対的に上げる。

これらの対策を総合的に行うことで、誤差のオーダーをピクセル量子化誤差のオーダー程度まで下げる、すなわち z 軸方向の

誤差が 10mm~20mm 程度に抑えることが可能である。この値は、本システムの利用方法を考えると妥当な値ではある。究極的には誤差は 0 であるのが理想だが、それを実現するためには別の角度のビデオカメラを追加するなどの対策が必要になると考えられる。

D-9 X' tal Scope システムの構築

投影実験から、クロストークのない自然な立体視が可能であることが実証された。

実証実験によってハーフミラーの選択の問題が浮上した。ハーフミラーは従来手法では輝度の最も高くなる透過率 50%の物が使われていた。しかし透過率 50%の物は提示映像の輝度は高くなるものの、周囲の環境の明るさも 50%になってしまうという欠点がある。屋外のように周囲が十分な明るさの場所ならば問題は無いが、室内では周囲の暗さが目立ち、VR 世界の現実世界への自然な重畳が成り立たない場合がある。そのため、環境に合った適切な透過率のハーフミラーを用いることが必要である。

そこで、VR 世界と現実世界の明るさが十分に得られる最適なハーフミラーを選択するため、いくつかの透過率の異なるハーフミラーの比較を行った。図 9 7 にその結果を示す。A は透過率の低いアクリル製ハーフミラー、B は透過率 60%のガラス製ハーフミラー、C は透過率 70%のガラス製ハーフミラー、D は透過率の高い透明アクリル板を用いた場合である。D の透明アクリル板を用いた場合が最も周囲が明るく、かつ提示映像の輝度も十分に得られていることがわかる。この結果から、X' tal Scope では室内で十分な輝度を得られ、かつ周囲の

環境の光量も阻害しないように透明アクリル板を使用することとした。

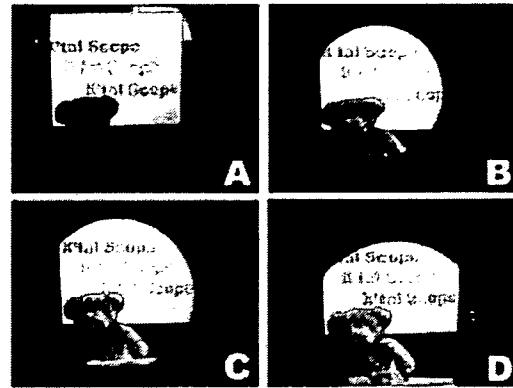


図 9 7 ハーフミラーによる輝度の比較

D-10 X' tal Visor システムの改良

検討を総合的に判断した結果、組み合わせレンズによる光学系の短焦点化という手法を最適なものとして提案する。(なお、以上の手法の他に(A)レンズミラー間の延長、(B)複数球面ミラーの利用、(C)グリーンレンズおよび複数球面ミラーの利用、などの手法も検討したが本稿では省略する)この手法の利点は以下のとおりである。(1)投影光学系の短焦点化により投影視野角が改善される。(2)2枚目のレンズの小型化により実視野角が改善される。(3)構成に必要な光学素子(特にレンズ)が入手しやすく、比較的安価である。(4)配置に厳密な精度を比較的不要としなため、設計・製作が容易。

前述のシミュレーションを基にその有効性の検証のため実装を行った。実装には光学実験台上で既存のレンズホルダを用いた。本手法適用前の投影像と適用後の投影像は図 9 8 のようになった。これから、投影視野角が広がっていることがわかる。実測した投影視野角は $38.1[\text{deg}] \times 21.8[\text{deg}]$ 、実視野角は、 $\theta_r = 4.40[\text{deg}]$ となり、理論に近い

値となった

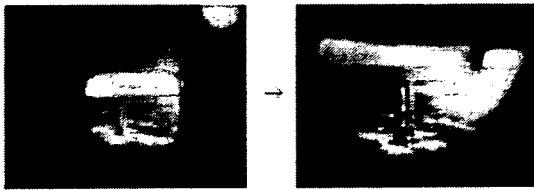


図98 複数のレンズを用いた光学系の短焦点化

E. 結論

各項目に対し以下の結論が得られた。

第1の課題「画像提示技術の確立」

(1-1) 光学系の設計

- **焦点深度と輝度の確保・補正の両立**

RPTにおける投影画像の品質を改善するために、スクリーン輝度と焦点深度の両立と言う観点から、プロジェクタ系に可変のアイリス絞りを追加した光学系の提案を行い、有効であることを確認した。

- **RPT を用いた視覚提示系の心理物理学的検証**

融像可能範囲や奥行き・大きさの知覚に着目し、心理物理学的手法を用いて検証を行った。その結果、本研究が想定する実世界指向型ディスプレイシステムの利用環境において融像可能範囲、奥行き知覚・大きさ知覚において視点とスクリーン部の距離が近すぎない（着座時の手のワークエリア内）限り、所望の性能を満たすことが実証された。

(1-2) レジストレーション設計

- **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**

今回我々が製作したレジストレーショ

ンの中で、実用に値すると判断されたのは断熱フィルムを使用した赤外線方式であった。それをを用いた提示実験により、マーカーかつ立体スクリーンの2重の機能を持つ電源不要なデバイスが達成できたとみなして良い。なお、今回提案した方式の中で使用した機材はいずれも安価・入手容易なものであり、当初の目的は達成したことを確認した。

- **実世界とシームレスなポインティングデバイスの開発**

軸方向に伸縮し、力覚提示時には伸長しデバイス外部の物体に接触することで力覚を提示し、また非力覚提示時には適宜収縮してデバイスと外部の物体との接触を避ける機構を持つ指し棒型のポインティングデバイスである。このデバイスは実空間と実体型ディスプレイ内のバーチャル空間の間でのシームレスにポインティングが可能である。これらの機能を満たすシステムを構築し、要素技術の有効性の検証を行い、有効であることを確認した。

最終的に目標とするシステム実装のテストベッドを開発し設計上の諸問題を洗い出し検証することで実装上の目処が立ったという意味で当初の目的は達成したことを確認できた。

- **視野外情報提示技術の開発**

遮蔽物体に視野外情報を提示する実験を行った。その結果、回り込み動作が適用できるような環境では観察者の頭部の位置を計測せずに、観察者視点の映像を生成し、適切な視野外情報を提示できる

ことを示した。

第2の課題「画像提示デバイスの試作」

(2-1) デスクトップ型

● 指先位置の取得と AR 映像の提示を同時に行う環境の構築

RPT を「患者・医療情報統合システム」に応用するテストベッドとして、デスクトップ型の AR 作業環境の構築における要素技術として(1)3次元空間内への3Dバーチャル物体の矛盾なき提示技術(2)3Dバーチャル物体の提示すべき位置の検出(3)2次元ディスプレイにおけるマウスに相当するさまざまな机上作業を行うユーザインタフェースの実装、の研究開発を行った。これらの機能を満たすシステムを構築し、要素技術の有効性の検証を行い、有効であることを確認した。最終的に目標とするシステム実装の最大の技術的難関となる姿勢・位置の計測とレジストレーションに関して実装上の目処が立ったという意味で当初の目的は達成したことを確認できた。

(2-4) 着座型

● X'tal Scope システムの構築

現実世界に VR 世界を重畳する立体視可能な5自由度両眼 RPT ディスプレイ X'tal Scope の実機の試作を行った結果、任意視点に応じた自然な立体視ができることが確認された。

(2-5) 眼鏡型

● X'tal Visor システムの改良

また、RPT 光学系の実視野角改善のための手法について検討を行い、総合的に

2枚のレンズを組み合わせることによって光学系の焦点距離を短くし、投影視野角を広げることに成功した。

G. 研究発表

● 論文発表

- 山崎, 園田, 吉田, 川上, 舘, "X'tal Visor : 頭部搭載型小型プロジェクタの設計と評価," , 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.12, No.2, pp.119-126, June, 2007

● 学会発表

- 再帰性投影技術を用いたデスクトップ型バーチャル作業環境の研究、第9回日本バーチャルリアリティ学会大会、pp.129-132,2004.9
- 再帰性投影技術におけるポインティングデバイス、第10回日本バーチャルリアリティ学会大会、pp.173-176, 2005.9
- 頭部搭載型プロジェクタ(第9報) - フルオープン型 HMP 「X'talVisor」の光学的特性 - 第10回日本バーチャルリアリティ学会大会、pp.239-240, 2005.9
- 吉田, 山崎, 梶本, 川上, 舘, "5自由度両眼 RPT ディスプレイの研究", 第11回バーチャルリアリティ学会予稿集, 490-493, Sep,2006
- 山崎, 新居, 川上, 舘, "レイグジスタンスの研究(第54報) - 再帰性投影技術を用いた両眼立体視システムにおける手元への視覚提示の効果-", 日本バーチャルリア