

エレクトロクロミックスを用いた 透過率可変型シースルーHMD

非会員 高田雅行 (日産自動車)

非会員 岸則政 (日産自動車)

非会員 松田国治 (ニコン)

非会員 舘 暁 (東京大学)

A new see-through Head Mounted display with variable transparency by Electrochromic
Masayuki Takada (Nissan Motor) Norimasa Kishi (Nissan Motor)
Kuniharu Matsuda (Nikon) Susumu Tachi (University of Tokyo)

This paper describes a new see-through display and its applications. The proposed new see-through display system constructed from 2 LCD-TVs and an Electrochromic (EC) mirror, is designed to solve the contrast problem that occurs when two images are simultaneously viewed. The EC mirror is composed of a half mirror with electrochromic layers coated on one side. The transparency ratio of the EC mirror can be specified within a certain range by controlling the amount of voltage on the electrochromic layers. The correct contrast can be obtained for almost every lighting condition if the proper half mirror is selected in the construction of the EC mirror.

As a demonstration of an application using EC mirror technology, a virtual driving simulator was developed for experimenting traffic related problems.

キーワード：人工現実感，仮想現実感，シースルーHMD，エレクトロクロミックス

1. はじめに

人間とコンピュータの新しいコミュニケーションをもたらすVR（仮想現実感）は3次元映像，3次元音響そして触覚，力フィードバック等を複合した技術である。近年のVRに対する関心は，その技術の革新性と応用範囲の広さにより極めて高いものがある。特に1.大きさ可変空間，2.体性感覚にあった仮想経験，3.全天周の仮想空間といった利点により種々の応用が提案研究されている。その一つの使い方として現実の世界と仮想世界とを融合させるシースルーシステムは，医療応用，各種シミュレーション，教育用のシステム等での応用を目的に研究が進んできている。自動車業界では，事前デザイン検討や，運転操作シミュレーションによる予防安全，サービス業務における訓練や作業指示等でその技術を活用したいという期待がある。従来のシースルーシステム²⁾では，画像を重ね合わせる比率が固定されており，様々な明るさ環境において前面風景と提示立体映像とを重ね合わせた場合，両者の輝度の違いが大きいと提示立体映像が見えなかったり，ぎらついて見にくくなるという問題がある。本論文では，この前面風景と提示立体映像の最適な融合の実現のためのEC素子による透過率可変ハーフミラーを活用したシースルー型HMDについて述べる。

2. 透過率可変シースルー型HMD

<2.1> シースルー型HMDの特徴と応用

シースルー型HMDの特徴とその応用としては下記の項目があげられる。

(i) 現実世界への情報付加(遠隔情報を含む)

現実世界の物体に対応した付加情報を提示したり，他の物体に遮られて直接見ることが出来ないものを見せることを可能とする。また，視野の外での事象に対応し，利用者の意識をその方向に注意を喚起するようなメッセージを提示することも可能である。教育や作業指示等の応用がもとも期待される。

(ii) 高品位な仮想世界の実現

現在の仮想現実感の表示技術において広視野と高画質の両立は困難な課題である。広域の表示に対してはプロジェクタ表示を行ない，注目点付近の限られた領域をシースルーHMDにより高画質での立体提示を行なうことで広視野と高画質を両立させることが可能である。各種シミュレータでのCG画像の補完といった観点での利用が考えられる。

<2.2> 透過率可変シースルー型HMD

シースルー型HMDでは表示装置から投影される立体映像とハーフミラー前面から入射する映像がハーフミラーで

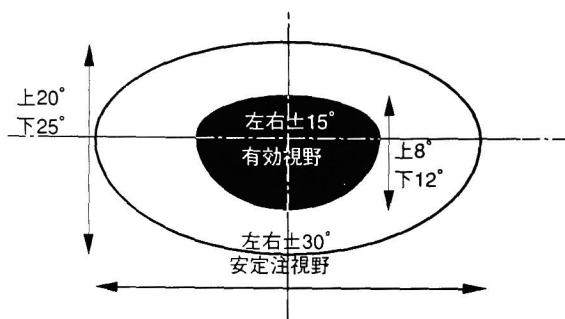


図1 人間の視野

Fig.1. Human's Field of View

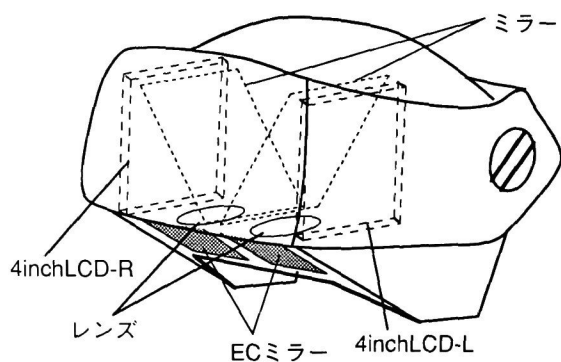


図2 シースルーHMDの構成

Fig.2. Construction of the See-Through HMD

融合する。この二つの映像を見やすいように融合するにはそのコントラスト比を調整する必要がある。単なるハーフミラーではコントラスト比は一定となり、事前にその明るさ環境にあったミラーを選択しておく必要があり、外部の明るさ環境が変化すると用いようとするそのミラーを取り替えねばならないという問題が発生する。そこで、環境の明るさ調整の手間を解決するために、透過率の可変範囲が広く、融合する映像のコントラスト比を自由に調整できるエレクトロクロミック (EC) 素子を透過率可変シースルーHMD用ハーフミラーに適用する。

まずシースルーHMDにおける立体画像提示について説明する。HMDでは左右両眼に対応する画像を2組の独立した表示装置に提示し対象物への両眼視差、輻輳角による

表1 シースルーHMDの仕様

Table.1. Specifications of theSee-Through HMD

ディスプレイ	4インチLCD
画素数	720×220
視野角(水平×垂直)	39°×29.8°
左右視野の重なり	100%
重量	2Kg
外形寸法	210×200×320(mm)
眼間距離	64mm

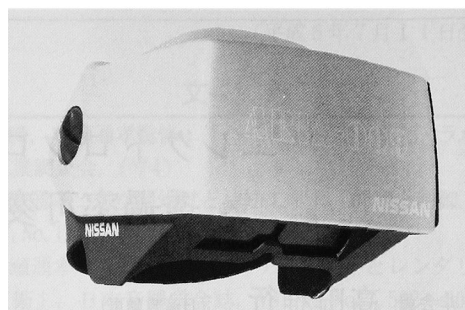


図3 シースルーHMD

Fig.3. see-through Head Mounted display

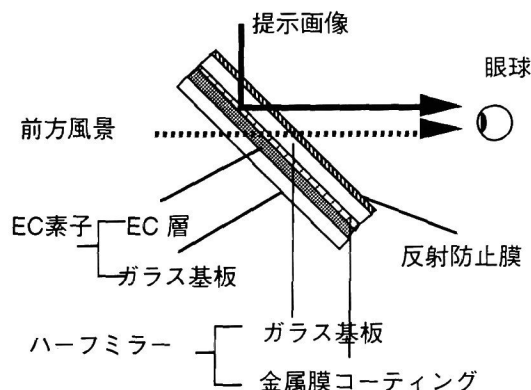


図4 ECミラーの構成

Fig.4. Construction of the EC mirror

知覚要因を主に利用している。そのため両方の光学系の光軸を平行とし、光軸の間隔は人間の眼感距離に合わせ、これに対応した両眼用の画像の撮影や計算機による画像生成を行なう。ところで、水晶体調節作用と輻輳角による距離感の生理的な要因であり両者による知覚の矛盾が大きいと両眼融合が不可能であったり眼球疲労を引き起こしたりする。そのため輻輳角による距離感で両眼融合可能な範囲に水晶体調節がされるように光学系を設計する。例えば、表示装置の画像を凸レンズによる光学系で遠方に虚像として提示する。また、HMDによって創り出される仮想空間において提示される対象物が認識できるように図1に示す人間の有効視野をカバーする範囲としてHMDの視野角はほぼ40°となるよう設計した。

シースルーHMDの構成は図2のように、眼球に対面するミラー部に固体型ECミラーを用い、さらに上に述べた光学系のための凸レンズ、そしてミラーを介し画像を提示する4インチ液晶テレビを見る構成となっている。

試作したシースルーHMDを図3に仕様を表1に示す。

3 ECミラー⁵⁾⁶⁾

<3.1> 試作したECミラーの基本構成

我々が試作したECミラーは、図4のように反射防止膜を塗布したハーフミラーと、エレクトロクロミックス (EC) 層をコーティングしてあるガラスとの張り合わせ構造

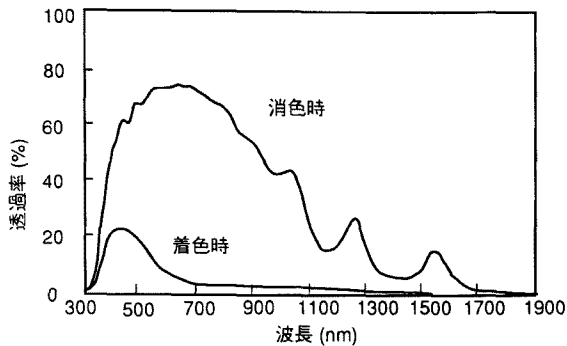


図5 ECミラーの透過率特性
Fig.5. Color spectrum of the EC mirror

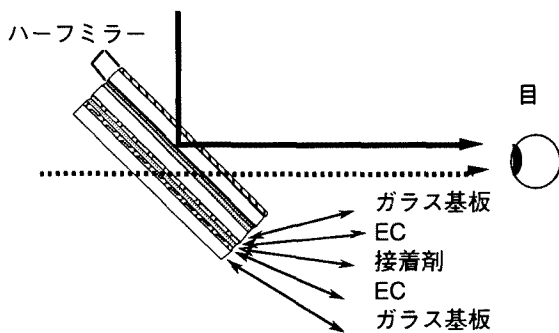


図6 SUPER ECミラー (2層) の構成
Fig.6. Construction of the 2 layer Super EC mirror

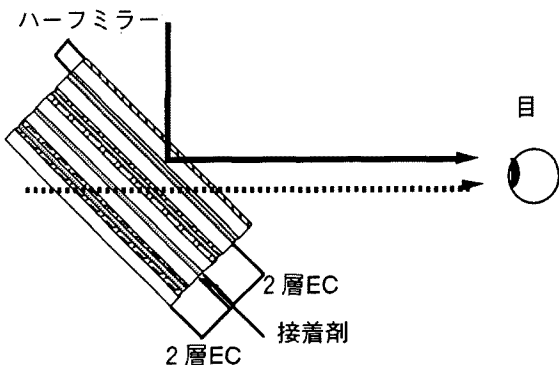
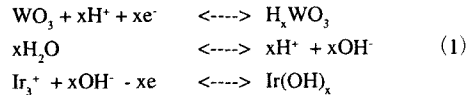


図7 SUPER ECミラー (4層) の構成
Fig.7. Construction of the 4 layer Super EC mirror

となっている。提示画像をこのハーフミラー側から入射することによりハーフミラー面で直接反射される。よって提示画像の輝度は一定の減衰特性で提示される。一方前方より入射される前方風景は、EC素子にかけられた電圧によって透過率が変化し減光する。これよりシースルー時の提示画像と前方風景の融合画像のコントラストを調整することを可能としている。

まず、二重像防止の観点でEC層としては固体型ECを利用している。EC層は5層から構成されており、両外側の層はITO(酸化インジウムと酸化スズの固溶体)からなる透明電極である。残りの3層は着色時の場合で説明すると三酸

化タングステン(WO₃)、酸化タンタル(Ta₂O₅)、酸化イリジウム(IrO_x)で一電極から+電極に向かってこの順に構成されている。これらはガラス基板上に形成されている。ECミラーは電圧を加えると式(1)に示す化学変化によりミラーが着色しその透過率が変化する。



電圧を加えると、一電極側に接続された三酸化タングstenは還元反応により青色のタングステンブロンズ(H_xWO₃)に変化する。酸化イリジウムは酸化反応により灰色の水酸化イリジウム(Ir(OH)_x)に変化する。タングステンブロンズは900nmを中心とした光を吸収し、これが主とした透過率の減衰要因となる。また、ミラーを消色させるには、着色時とは逆の電圧をかけることにより式(1)の化学反応は逆方向の反応を示し消色する。着色時と消色時におけるECミラーの透過率特性を図5に示す。近赤外における透過率の減少は薄膜による透明電極の反射による。EC素子の透過率は、蓄積された電荷量に依存し、与えられた電圧が高いほど速く変化する。

試作したECミラーは全体の厚みは1.8mmである。このとき用いたガラス基板の厚みは0.7mm、EC層は約2μmである。

<3.2> 多層構造を持つSUPER ECミラーの構成

適用範囲を拡大しより大きな透過率可変範囲を持たせるために、EC層を2層にコーティングしSUPER ECミラーを試作した。この構成図は図6に示すようになっている。これは両外側に配置されるガラス基板内側にそれぞれEC層をコーティングしその間を接着剤により接続する構成となっている。また、4層のSUPER ECミラーは図7のように、2層のSUPER ECを2組用意しこれを接着剤にて重ね合わせることで多層のSUPER ECミラーを作ることが出来る。試作した4層のSUPER ECミラーは全体の厚みは2.2mmである。このとき用いたガラス基板の厚みは0.4mm、各EC層は約2μmである。

3.3 ECミラーの性能とその評価

このEC素子単体での透過率可変範囲は最適設計下では表2に示すように70%から20%の間で自由に変わることが出来かつ角度依存性もないという特徴を持つ。ま

表2 ECとLCDの比較

Table.2. Comparisons of EC and LCD

	EC	LCD
透過率	70-20%	28-6%
応答時間(オーダ)	sec	msec
電源	1.5V DC	6V AC
角度依存性	None	Yes

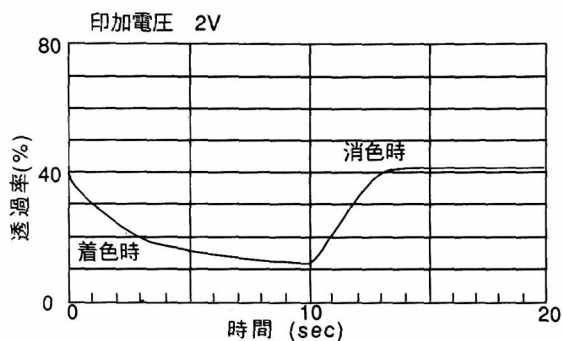


図8 ECミラーの時間特性

Fig.8. transparency property of EC mirror

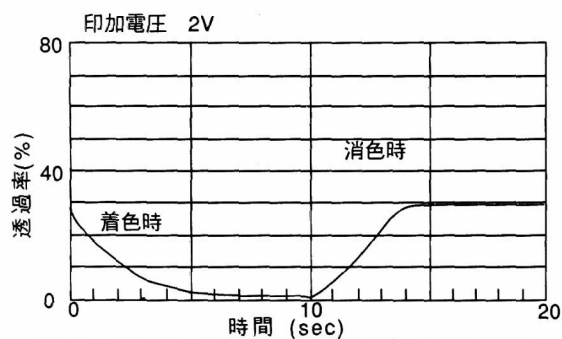


図9 SUPER ECミラー (2層) の時間特性

Fig.9.transparency property of 2 layer Super EC mirror

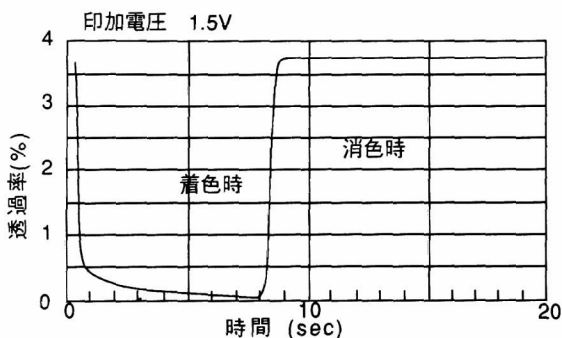


図10 SUPER ECミラー (4層) の時間特性

Fig.10. transparency property of 4 layer Super EC mirror

た、他の手段として考えられる液晶ディスプレイ (LCD) では表2に示すように角度依存性を有するとともに透過率の可変範囲が狭い。

次に試作した各ECミラーの透過率特性 (時間経過) を図8, 図9, 図10に示す。

今回試作したECミラーはハーフミラーとして反射:透過が6:4の特性になっており全体としての透過率特性は図9に示すように10% to 40%の範囲で調整することができる。2Vの印加電圧をもちいた実験で約10秒で透過率が最小になり約3秒で元の透過率最大の状態に復帰する。2層構造のSUPER ECミラーにおいてもハーフミラーは反射:透

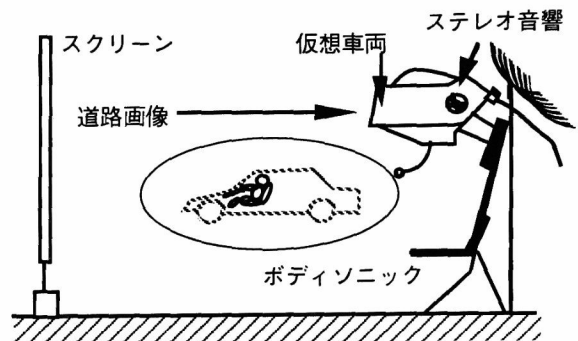


図11 予防安全シミュレータ

Fig.11. Traffic accident prevention Simulator



図12 3次元メッセージ提示システム

Fig.12. 3D Message Display System

過が6:4であり時間特性はほぼ同じで、透過率特性は0.3 to 28%の範囲で調整することができる。4層構造のものは昼のクルマ内での使用を考慮しハーフミラー層の透過特性を反射:透過を9:1としている。また、全体の厚みを薄くするためにガラス基板の厚みを変更した。そのため成膜条件を変更したため、印加電圧を1.5Vに下げた。時間に対する応答性は向上している。約5秒で透過率が最小になり約1秒で元の透過率最大の状態に復帰する。透過率特性は0.05 to 3.6%の範囲で調整することができる。

また、EC素子には電圧印加を止めてもその状態が保持されるというメモリー効果があり、1時間後でもほぼ同一の透過率特性を保持する。

4. シースルー型HMDの応用システム

予防安全システム, 3次元メッセージ提示システムについてその概要を述べる。

<4.1> 予防安全システム

事故解析の目的の一環で行おうとしている研究用予防安全シミュレータの概要を図11に示す。前面に置かれたスクリーンにプロジェクタで高速道路の映像を提示し、シースルーHMDからは自動車の3次元モデルを提示している。安全に再現性よく実験が出来るこのシミュレータを事故防止の観点で高速道路で自車を追い抜く車両がある場合や、前車が急ブレーキをかけた場合にどのように警報を提

示するか実験に利用している。事故運転シーン等で重要になる速度距離感に関する実験⁷⁾で活用するには、画像の解像度の影響が大きい。実車とCGにおいて現実の車間距離、速度との相関が得られるように今後十分CGの解像度を向上させる必要がある。

4.2 3次元メッセージ提示システム

これは予防安全システムをベースとし仮想車両の代わりに3Dの情報を提示することで、被験者に指示したいものの方に自然と目をむけさせることを意図としたシステムである。シースルーHMDからみえる画像を図12に示す。今後は、故障診断や修理の作業のために故障部品の位置や情報を実物の車両に重ね合わせ投影し指示する教育・作業支援用システムについて検討していく予定である。

5. 透過率可変シースルーHMDの評価

ここでは4章で述べた応用システムの中で明らかになった透過率可変シースルーHMDの評価について述べる。

<5.1> 重ね画像の見やすさ

(1) 重ね画像のコントラストについて

画像を重ねた場合の見やすさに関して、自動車で用いられるHead Up Display (車両のフロントウィンドウの一部に半透過板を設け、そこに投影表示される速度等の表示が前方風景と重なり合っ見える表示装置)において前方風景と提示画像の明るさの比較により見やすい範囲、最適条件を求めた⁸⁾実験結果である図13を基にシースルーHMDに関して検討した。

まず、前方風景の明るさについて考えてみる。一般に、室内での明るい色の壁は120cd/m²、暗い色の壁で40 cd/m²、予防安全のシステムでのプロジェクタの明るさは10~30cd/m²程度である。また、屋外での運転席からフロントウィンドウを通した明るさの環境は、例えば晴天時の路面で600cd/m²、白色の車両で1000 cd/m²、暗色の車両で100cd/m²程度である。また、曇天時では、路面が120~190cd/m²、白色の車両で500cd/m²、暗色の車両で80cd/m²程度である。これらの前方風景はECミラーによりECとハーフミラー層により透過光が減衰される。

次に投影画像の明るさについて考える。HMDに使用している液晶テレビの輝度は白色部で80cd/m²、パターン画像

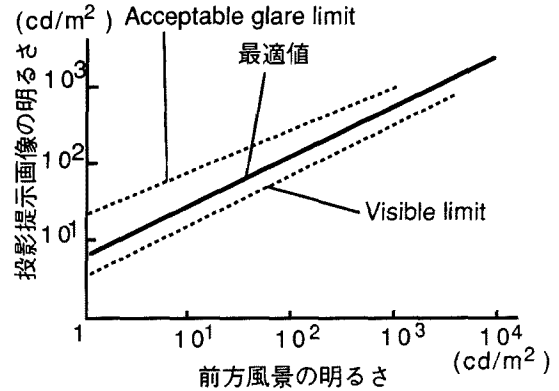


図13 コントラスト特性

Fig.13. Contrast property

で30cd/m²程度である。HMDのECミラー部での明るさは、これらの液晶テレビの輝度はハーフミラー層のみによって減衰されEC素子の透過状態に影響されず一定となる。

ここで室内、プロジェクタを使用したシミュレータ、屋外での運転席からの環境のそれぞれについて、投影画像としては白一色の画像を重ね合わせた場合で明るさの比較を行った。(表3)

室内においてECミラーを使用すると、明るい色の壁は着色時で120cd/m²、暗い色の壁は消色時に16 cd/m²となり、投影画像は48cd/m²となり、図13の最適値に近い所での重ね合わせ状態が得られる。

プロジェクタの場合、着色時で明るい場合が3cd/m²、消色時で暗い場合が4cd/m²、投影画像は同じく48cd/m²であり、プロジェクタが暗い場合には消色時でも投影画像が少しギラつくため投影画像の輝度を抑えることで最適に近い状態にすることができた。

屋外で運転席からの場合は4層のECミラーの使用により、投影画像の明るさが72cd/m²に対し、1000cd/m²~80cd/m²の前方の明るさが、消色時で36cd/m²~2.8cd/m²で重ね合わせて認識できる範囲に入っており、着色時には0.5cd/m²~0.04cd/m²で前方風景をほぼ遮り提示画像のみの提示とすることができた。

(2) 色、大きさと重ね画像

表3 重ね画像の明るさ

Table.3. Brightness of combined images on EC mirrors

背景画像		投影画像 白色部		ECミラー	super-EC(2層)	super-EC(4層)
				48	48	72
室	壁	明部	120	48~12	33.6~0.36	4.32~0.06
		暗部	40	16~ 4	11.2~ 0.12	1.44~0.02
内	プロジェクタ	明部	30	12~ 3	8.4~ 0.09	1.08~ 0.015
		暗部	10	4~ 1	2.8~ 0.03	0.36~ 0.005
車 両	前方風景	明部	1000	400~40	280~3	36~0.5
		暗部	80	32~ 4	22.4~0.24	2.88~0.04

単位 (cd/m²)

今回用いたコントラスト特性は 投影画像がHead Up Display用の無色背景上に単一色の表示というコントラストのかなりはっきりした画像の場合である。シースルー型HMDにおいても提示画像が白一色の簡単な図形(矢印やワイヤフレーム画像)の場合はほぼ同じ状態と考えられ、提示画像が背景内に立体的に見えることを確認した。しかし、提示画像がカラー画像や複雑なパターンの表示(クルマ、外部の景色)の場合に関しては、例えば青色の部分などで透けて背景画像が見えたり、複雑な図形の画像ではイメージの中で明るい部分とくらい部分が存在するとき、また、イメージが時間的に明るさが変化するときについては、コントラストがはっきりせず背景との重なりが見にくいという問題があった。カラーや、複雑図形における重ね合わせ画像の見やすいコントラスト条件については昼/夜、野外/屋内を問わず利用できるものを目標として今後さらに検討を重ねる必要がある。

<5.2> 投影画像の提示位置、距離について

(1) 現実世界と仮想世界の3次元位置上の整合性

シースルーHMDにおいては現実の世界に仮想世界を重ね合わせているため現実世界と仮想世界の3次元位置上の整合性が問題になる。ひとつは設計値に対する位置のずれの問題であり、人間の眼球位置やHMDの光学系の位置の誤差やレンズの焦点距離の設計値との誤差、またHMDの位置や姿勢の計測誤差である。これらはあらかじめ誤差を計測し矯正用の調整値を求めておくことで画像生成の変換行列を調整するなどに対応可能である。

(2) 提示位置に関する水晶体-輻輳角の整合性

もう一つは画像提示距離の問題である。シースルーHMDの構成の節で述べたように輻輳角との関係で画像提示距離は両眼融合が可能な範囲で一定の距離に提示されるようになっている。しかしシースルーによる前方風景と重なった場合には現実の世界の風景に対して眼球が水晶体の調節を行なうため同じ距離に提示されるべき仮想世界がぼけるということになる。これを解決するには提示される対象物の距離に応じて凸レンズによる虚像提示距離を可変とする光学系が必要となる。このような生理的に適合したHMDの光学系の実現がシースルーHMDの研究の大きな課題である。

6. おわりに

ECミラーは正負電圧をかけることにより背景画像の明るさを制御することができる。従来の実験環境では前方風景の明るさが変化するため融合画像が見にくい場合があったが、実験環境に応じたECミラーを使用し、前方風景の明るさに応じて透過率を設定することで単一色の画像で見やすい重ね合わせ画像が得られることを確認した。今後は更に、5章で述べたように各種課題について検討していきたい。

(平成6年7月5日受付)

- (1) 舘 暉: "人工現実感", 日刊工業新聞社, 1992.
- (2) 廣瀬, 木島, 佐藤, 石井: "シースルー型HMDを用いた仮想空間による実空間の修飾の研究", 第6回ヒューマン・インターフェース・シンポジウム論文集, PP. 1-8, 1990.
- (3) 渡部 他: "視覚の科学", p. 171, 写真工業出版, 1975
- (4) 舘 暉, 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, 第7巻4号, pp. 314-325, August 1989.
- (5) N.Kishi et al.: "A New See-Through Display Using an Electrochromic Mirror and Its Applications.", International Conference on Advanced Mechatronics, JSME, August 1993.
- (6) 岸 則政: "自動車業界におけるVR応用技術", 第61回大会講演要旨集, 電気化学協会, April 1994.
- (7) 山村 智弘: "実車とCGIにおける車間距離と速度の認識の違いについて", 自動車技術会第11回ドライビングシミュレータ専門委員会, March 1993.
- (8) H. Kato, H. Ito, J. Shima, and M. Imaizumi: "Development of Hologram Head-Up Display", pp. 21-27, SAE, 1992.

高田 雅行 1961年8月6日生まれ。1984年、筑波大学第三学群情報学類卒業。1986年、筑波大学大学院修士課程理工学研究科修了、日産自動車(株)入社。これまで電子制御開発支援環境の開発、人工現実感の研究に従事。



岸 則政 1949年9月7日生まれ。1972年、早稲田大学理工学部電子通信学科卒業。1977年、早稲田大学理工学研究科情報工学博士課程修了、工学博士、1978年日産自動車(株)入社。これまで、音声認識、人工知能、人工現実感の研究に従事。



松田 国治 1968年6月14日生まれ。1991年、北海道大学工学部応用化学科卒業、(株)ニコン入社。機能性薄膜、エレクトロクロミズムの研究に従事。



舘 暉 1946年1月1日生まれ。1968年、東京大学工学部計数工学科卒業。1973年、東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、工学博士、東京大学助手。1975年、通産省機械技術研究所研究員。その後主任研究員、バイオロボティクス課長。1979年から1980年、マサチューセッツ工科大学客員研究員。1989年、東京大学助教授。1992年、東京大学教授、現在に至る。

