

| | | | |
|-----------|----------------------------|-------------|---------------|
| | かた | ぎり | ばく |
| 氏名 | 片 | 桐 | 麦 |
| 授与学位 | 博士(工学) | | |
| 学位授与年月日 | 平成19年3月27日 | | |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第4条第1項 | | |
| 研究科、専攻の名称 | 東北大学大学院工学研究科(博士課程)電子工学専攻 | | |
| 学位論文題目 | 投射型ディスプレイ用スクリーンの光学設計に関する研究 | | |
| 指導教員 | 東北大学教授 内田 龍男 | | |
| 論文審査委員 | 主査 東北大学教授 | 内田 龍男 | 東北大学教授 川又 政征 |
| | | 東北大学教授 金井 浩 | 東北大学助教授 宮下 哲哉 |
| | | 講師 川上 徹 | |
| | (未来科学技術共同研究センター) | | |

1. はじめに

多くの画像情報を多くの人へ伝えることができ、また従来にない臨場感・実在感を観察者にもたらしることができる大画面・高精細ディスプレイは、次世代の情報ディスプレイや次世代テレビなどの実現の鍵を握るデバイスとして注目を集めている。提案されている様々な大画面ディスプレイの中でも、投射型ディスプレイ(プロジェクションディスプレイ)は小型の画像表示デバイスの画像を光学的に拡大してスクリーンに投射するシステムであり、大きなディスプレイパネルを必要とせず、液晶ディスプレイやプラズマディスプレイに比べて容易に大画面化を達成可能である。

しかしプロジェクションディスプレイは視野角や面内輝度分布といった表示特性で劣る。これらは主にディスプレイの拡散特性(輝度変化の角度依存性)に依存する問題であり、プロジェクションディスプレイにおいて拡散特性を決定するスクリーンによって生じる問題である。

そこで本研究では大画面に対して圧倒的に有利なプロジェクションディスプレイに着目し、そのスクリーン拡散特性を最適化することにより高品位な大画面・高精細ディスプレイを実現することを目的とした。

2. 拡散特性の最適化

まずスクリーンの拡散特性 $L(\theta)$ として、必要な角度範囲内で輝度を一様にした、最も基本的なトップハット拡散特性(トップハットタイプ)と、正面中央付近で最も明るくした高効率拡散特性(高効率タイプ)を設定した。後者については、観察者の存在確率が最も高い正面中央付近の輝度を重視すると共に、正面中央からずれるに従って輝度を低下させるが、それを人間が感じない条件に抑えたものである。具体的には $L(\theta)$ に対して、人間が感じる変化量 $dL(\theta)/d\theta$ の最小値(弁別閾)を $U(\theta)$ とすると、Weber の法則

から $U(\theta)/L(\theta)$ が一定値になることを考慮して最適な輝度分布 $L(\theta)$ を求めた。ここで $L(\theta)$ は対象性から偶関数であるため、その最も簡単な形として①2次関数および②4次関数と仮定して設計をおこなった。また①および②の結果を考察することで、正面が最も明るい $L(\theta)$ はあらゆる角度 θ で $U(\theta)/L(\theta)$ が一定な関数であるという結論に至り、この式を解いて $L(\theta)$ を③指数関数と仮定して設計をおこなった。 $U(\theta)/L(\theta)$ の値は人間がむらを感じるか否かの空間周波数特性^{[1], [2]}から 0.02 と決定した。拡散角度範囲はディスプレイに対する観察位置の一般的な分布^[3]から $\pm 50^\circ$ と決定した。

このような拡散特性 $L(\theta)$ に対してむらが認識されるかどうかの実験をおこなった。まず静止画について、LCD 画面内に仮想ディスプレイ画面を出力し、この仮想ディスプレイ画面のむらが認識されるかどうかを、決定した値 0.02 を中心に $U(\theta)/L(\theta)$ を変化させた $L(\theta)$ に対して実験した。ここで LCD は Sharp 製 LC-45GD1 を用いた。実験から $U(\theta)/L(\theta)$ の値が大きくなるにつれむらが認識されやすくなり、 $U(\theta)/L(\theta)=0.02$ 以下で許容される程度のむらであることがわかった。ここで許容される程度のむらとは、むらがわかるが気にならないという評価と多少気になるという評価が共に被験者の半分づつから得られるむらである。

動画に関しては仮想ディスプレイ上に画像を表示し、この画像を t_s 秒間で画面端から端まで動かし、むらが認識されるかどうかを実験した。画像は人間が注目する対象の代表として人物の顔、および均一な対象の代表として灰色の帯を選択し、様々な t_s ($=0.5, 1, 2(\text{sec.})$) について実験をおこなった。実験から t_s を変化させても $U(\theta)/L(\theta)=0.02$ 以下で許容される程度のむらであることがわかった。

このようにして導出したトップハットタイプと、高効率タイプ (②4次関数型、③指数関数型) についてスクリーンゲインの角度依存性を図 1 に示す。ここでゲインとは完全拡散光に対する輝度の比である。

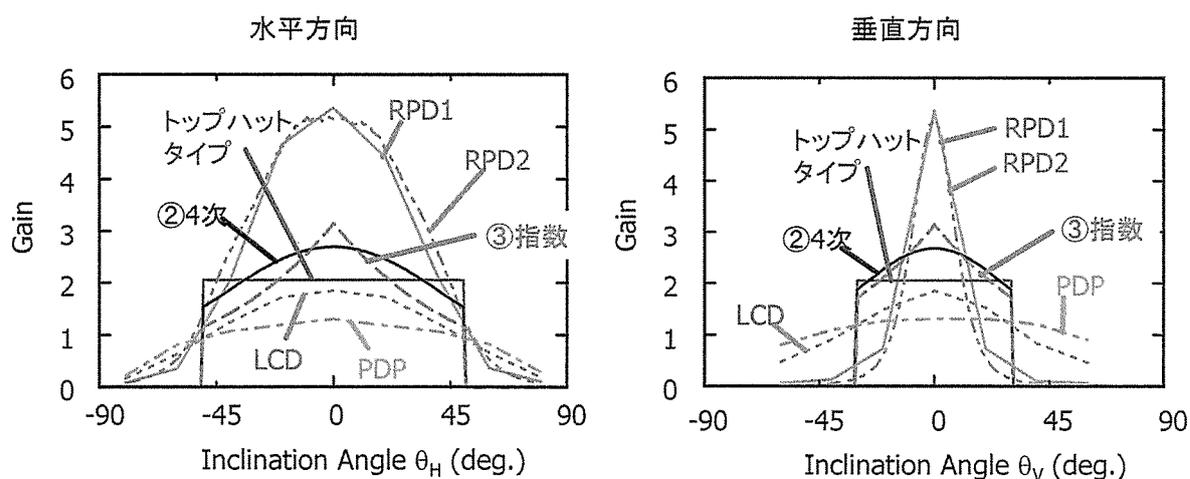


図 1. 導出した拡散特性と一般的ディスプレイ
拡散特性との比較

図には比較対象として一般的なディスプレイの代表的な特性も併せて示した。LCD が前述のもの、PDP が Panasonic 製 TH-42PX300、RPD1 が JVC 製 HD-52MD60、RPD2 が Epson 製 ELC-47P1 である。

グラフからトップハットタイプ、高効率タイプ共に必要な視野角を満たし、かつ高いゲインを実現していることがわかる。また高効率タイプの拡散特性は人間がむらを感じない範囲で正面方向に強いエネルギーを集めたさらにゲインの高い、明るい拡散特性であることがわかる。このとき高効率タイプの③指数関数型は正面中央のゲインでトップハットタイプの約 1.5 倍が得られることがわかる。

3. 最適拡散特性の実現

拡散特性制御性の高さ、後方散乱の少なさ、量産性の高さから考えて微小表面形状拡散素子および内部屈折率分布型拡散素子がリアプロジェクションディスプレイの拡散素子に適している。

微小表面形状拡散素子は表面形状の傾きで出射光の出射角度を、表面形状傾きの分布で出射光の出射強度を制御することが可能である。この設計手法を基にしてトップハットタイプ、および高効率タイプの拡散特性が実現可能であることを光線追跡により確認した。

本研究で用いた内部屈折率分布型拡散素子・DLC フィルム (Diffused Light Control Film) は素子を積層することによって拡散特性を制御することができる。この設計手法を元にしてトップハットタイプ、および高効率タイプ (図 2 参照) の拡散特性に非常に近い特性を得られることを実験により確認した。

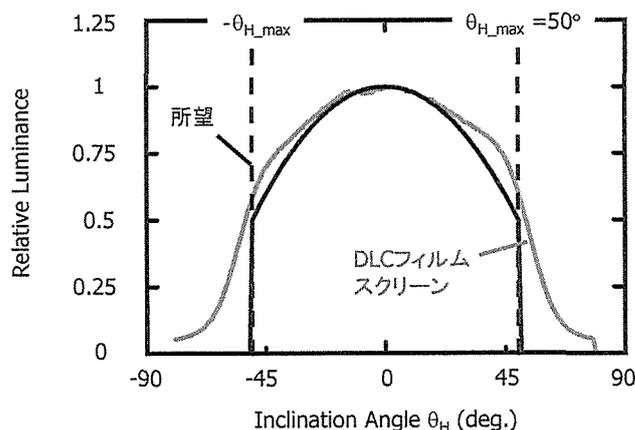


図 2. DLC フィルムによる拡散制御結果

また DLC フィルムは、特定の角度範囲から入射した光に対して拡散特性の入射角度依存性が低いという特異で優れた特性を有するため、従来のリアプロジェクションディスプレイに必須であったフレネルレンズが不要となる。このため従来のスクリーンのようなフレネルレンズに由来する 2 重像 (図 3 参照) を生じさせることがなく、ぼけのない鮮明な画像が得られる点で著しく優れていることを確認した。

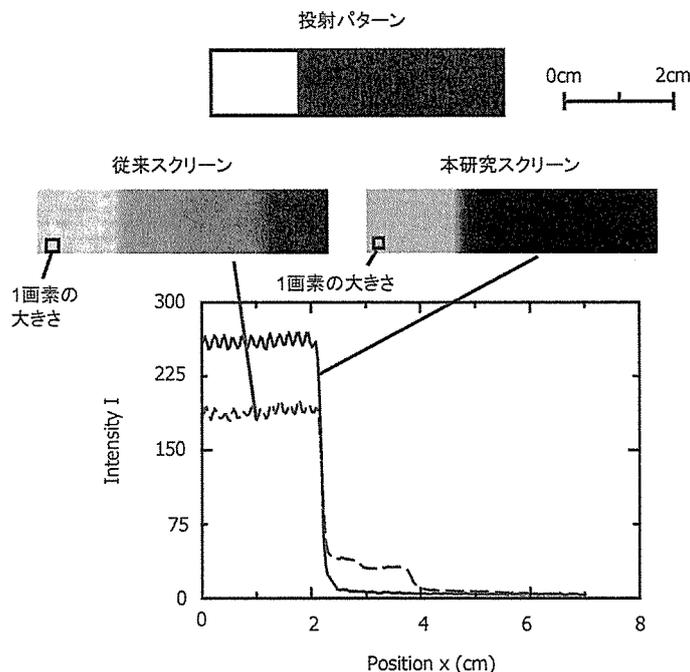


図 3. 従来スクリーンと本研究スクリーンの 2 重像比較

4. フロントプロジェクションディスプレイの明環境における高コントラスト化

上記の拡散特性制御のさらなる応用として、フロントプロジェクションディスプレイの明環境における高コントラスト化について検討した。

一般にフロントプロジェクションディスプレイ用スクリーンは明るい環境下において、プロジェクタ光のみでなく外光までも観察者の方向に拡散させてしまう。このため外光が拡散反射しプロジェクタ光に混ざり、表示画像のコントラスト比が低下してしまうという問題がある。このことから高いコントラスト比を有するフロントプロジェクションディスプレイシステムの設計はいかにしてプロジェクタ光と外光を分離し、プロジェクタ光のみを観察者の方向に拡散させるかが重要な課題となる。

そこでプロジェクタ光と外光の入射角度の違いを利用して、特定の角度範囲から入射するプロジェクタ光のみを観察者のいる方向に拡散させるシステムを考案した。ここでプロジェクタ光が入射する特定の角度範囲を、プロジェクタ光入射角度範囲とする。このような入射光の拡散・非拡散をコントロールする特異な制御は、従来用いられている表面形状型や内部微粒子型の拡散素子では実現できない。そこでこのような特異な制御を実現する拡散素子として前述の DLC フィルムを用いた。これによりプロジェクタ光入射角度範囲から入射した光のみを拡散させ、プロジェクタ光入射角度範囲から入射した光以外は拡散させない拡散特性が実現可能となる。

前述の DLC フィルムは透過型の拡散素子であるため拡散反射を生じさせるためには反射板を用いる必要がある。ここで観察者はスクリーン正面に存在し、この正面方向を中心にプロジェクタ光を拡散させる必要があり、プロジェクタ光入射角度範囲は外光入射の少な

いスクリーン下方とするため、反射板は光の向きを正反射方向から変える必要がある。このため反射板として鋸歯状の反射板を用いなければならない。

このような原理に基づきスクリーンを試作し、プロジェクタ光入射角度範囲から入射した光のみを観察者の方向に拡散反射することを確認した。また明るい環境で本研究のスクリーンと従来のホワイトマットスクリーンを比較し、図 4 に示すような表示画像を得た。図からホワイトマットスクリーンは外光の影響によりコントラスト比が 3:1 と著しく低下するのに対して、本研究のスクリーンはプロジェクタ光のみを観察者の方向に拡散させるために、明るい環境下においても 57:1 と高コントラストが得られることがわかる。

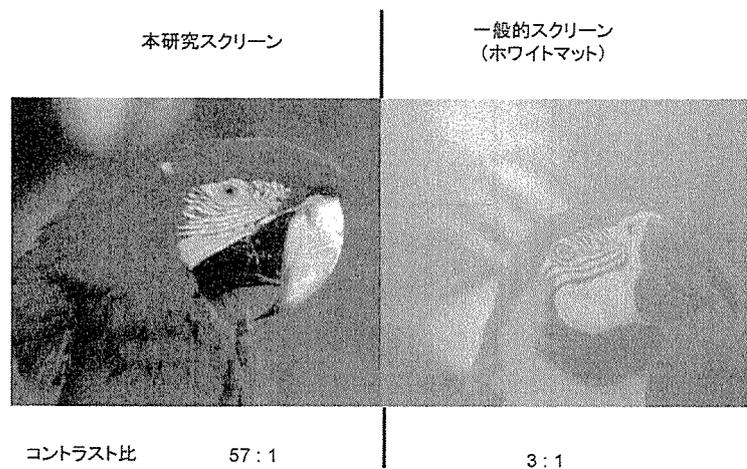


図 4. フロントプロジェクション明環境投射画像

以上より本研究ではプロジェクションディスプレイ用スクリーンの拡散特性の設計論について検討し、十分な視野角と高い効率を兼ね備え、かつ人間がむらを感じない拡散特性を有する高品位リアプロジェクションディスプレイを実現した。またプロジェクタ光と外光に対して異なる拡散特性を有するスクリーンの設計論について検討し、明環境において広い視野角と高い明所コントラスト比を両立するフロントプロジェクションディスプレイ用スクリーンを実現した。

これらは高品位な大画面・高精細ディスプレイの実現に貢献する有用な拡散制御・設計理論である。

参考文献

- [1]. F. L. VAN NES et al., JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA (1967) p. 401-406 "Spatial Modulation Transfer in the Human Eye"
- [2]. Watanabe et al., Vision Res. Vol. 8, (1968) p. 1245-1263 "Spatial Sine-Wave Responses of the Human Vision System"
- [3]. 三菱電機—成蹊大学、フラットパネルディスプレイの人間工学シンポジウム 2005、家庭におけるテレビの観視条件の実態調査

論文審査結果の要旨

液晶ディスプレイやプラズマディスプレイの大型化が進んでいるが、更なる大型化には高度な製造装置の大型化を必要とし、技術的にもコスト面でも困難が著しく増大する。これに対して投射型ディスプレイ（プロジェクションディスプレイ）は上述の問題を解決できる有力な方式である。しかし、現状では画像の鮮明度、視野角、明所コントラストなどが十分でないために高精細テレビ（HDテレビ）などへの普及が進んでいない。本研究はこれらの問題を解決して高品位なプロジェクションディスプレイを実現するために、最も重要なスクリーンに焦点を当て、その拡散特性の最適設計を行ったものであり、全文4章よりなる。

第1章は序論である。

第2章ではスクリーンの拡散角度分布の最適設計を行うと共に、これを実現する拡散素子の設計手法について述べている。

まずスクリーンの拡散角度分布として、必要な角度範囲内で一様にした、最も基本的なトップハット拡散特性（トップハットタイプ）と、正面中央付近で最も明るくした高効率拡散特性（高効率タイプ）を設定した。後者については、観察者の存在確率が最も高い正面中央付近の輝度を重視すると共に、正面中央からずれるに従って輝度を低下させるが、それを人間が感じない条件に抑えたものである。具体的には、輝度の角度依存性を $L(\theta)$ とした場合、人間の感じる変化量 $dL(\theta)/d\theta$ の最小値（弁別閾）を $U(\theta)$ とすると、Weberの法則から $U(\theta)/L(\theta)$ が一定値になることを考慮して最適な輝度分布 $L(\theta)$ を求めた。また、この輝度分布が実際にむらを感じるか否かを静止画と動画の両方について実験を行った。その結果、設計した高効率タイプで輝度むらは認識されず、しかも正面中央の輝度はトップハットタイプの約1.5倍となることを明らかにしている。これは実用上極めて重要な成果である。

次いでこのような拡散角度特性を実現するために微細表面形状型および内部屈折率分布型を取り上げ、トップハットタイプと高効率タイプの拡散特性を実現する条件を明らかにしている。特に内部屈折率分布型については、実際にスクリーンを試作し、従来のスクリーンと比較して画像のぼけ、視野角および外光反射の点で著しく良好な特性が得られることを明らかにしている。これは実用上有用な成果であり、高く評価される。

第3章では明るい場所でも使えるフロントプロジェクタ用スクリーンの開発について述べている。従来のプロジェクタでは外光によってコントラストが著しく低下するために暗い環境で使うことが要求され、用途が大きく限定されていた。そこで本研究では、この問題の解決を試み、特に内部屈折率分布型の拡散角度範囲を巧みに設計することにより、天井灯や窓からの光は床の方向に落とし、プロジェクタからの光は観察者側に拡散させる画期的なスクリーンの実現に成功した。これによって明るい環境でもコントラストを落とさずに鮮明な画像を表示することができることを示している。これらは新しいフロントプロジェクションディスプレイの可能性を示したものであり、有効性の高い研究成果として評価できる。

第4章は結論である。

以上要するに本論文は、プロジェクションディスプレイ用スクリーンの拡散特性の設計論について検討し、最適条件を明らかにすると共に、実際に高品位なプロジェクションディスプレイが実現できることを示したものであり、電子工学および画像工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。