一般論文

照明変化による順応を考慮したプロジェクタ投影像の画質改善

上三垣さゆり*,平井経太*,山本昇志**,瀧圭亮*,津村徳道*,中口俊哉*,三宅洋一***

(*) 千葉大学大学院融合科学研究科

(**) 東京都立産業技術高等専門学校

(***) 千葉大学フロンティアメディカル工学研究開発センター

住所:(*,***) 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

(**) 〒116-0003 東京都荒川区南千住 8-17-1

Paper

"Image quality improvement of projection image under lighting condition with color appearance model"

Sayuri KAMIMIGAKI^{*}, Keita HIRAI^{*}, Shoji YAMAMOTO^{**}, Keisuke TAKI^{*}, Norimichi TSUMURA^{*}, Toshiya NAKAGUCHI^{*} and Yoichi MIYAKE^{***}

(*)Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University

(**)Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology

(***)Research Center for Frontier Medical Engineering, Chiba University

Address :

(*, ***) 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-city, 263-8522, Chiba, Japan

(**)8-17-1, Minamisenju, Arakawa-ku, 116-0003, Tokyo, Japan

要旨:

本論文では、CIECAM02 を用いた照明環境下におけるプロジェクタ投影画像の画質改善手 法について述べる.プロジェクタは暗室環境下での利用が一般的ではあるが、近年の小型 化・可搬性の向上により、屋外や展示会場などでも活用されてはじめている.照明された 環境下では、明るい光源をプロジェクタに用いることで文字情報は認識可能である.しか し、画像を投影する場合はコントラストの低下や色度のズレにより、暗室下のような再現 が困難となる.そこで本研究では、周囲環境光変化の視覚的な影響を考慮した投影画像の 画質改善手法を開発した.提案手法では、カメラを用いてプロジェクタ投影面の三刺激値 を計測したのち、その三刺激値に順応した場合の反対色応答と明るさ応答を CIECAM02 か ら算出する.そして、照明された環境下での反対色応答とコントラストを暗室下での見え に近づける補正を行うことにより、画質改善を行った.両眼隔壁を用いた一対比較法によ る主観評価実験を行い、有効性を確認した.

キーワード:

プロジェクタ投影像, CIECAM02, 順応, トーンマッピング, ガマットマッピング

Abstract:

We propose an image-quality improvement method of projected images under lighting conditions. In recent years, image quality of the projection display system has increasingly improved, and the system has come to widely use not only as projector but also television system. The color appearance and the resolution of the projected image, however, are influenced by the lighting conditions on the screen. Therefore, in this paper, the CIECAM02 color appearance model is introduced to improve both color and tone reproductions of the projected images under lighting conditions. Chromatic and achromatic channel responses in CIECAM02 are calculated from an input image under a lighting condition. The adapted achromatic response is used for tone mapping to preserve the detail components of the images. On the other hand, the adapted chromatic response is used for accurate color reproduction, which is optimized by the gamut compensation based on the difference between the gamut of projection color under lighting and dark conditions. For the validation, the original images and the corrected images by the proposed method are evaluated by subjective experiments using a paired comparison method. As a result, it is shown that the proposed method can improve the image quality under the lighting conditions.

Keywords:

Projection image, CIECAM02, Adaptation, Tone mapping, Gamut mapping

1 緒言

プロジェクタは暗室環境下(以下,暗所環境と記す)での利用が一般的ではあるが,近年の 小型化・可搬性の向上により,屋外や展示会場などでも活用されてはじめている¹⁾.更に, 光源の高輝度化や表示素子のコントラストの改善により,照明や外光が存在する環境下(以 下,明所環境と記す)でも文字やグラフなどの情報を正確に伝えることができる.しかしな がら,写真やイラストなどはコントラストの低下や色度のズレなどから,照明や外光の影 響が少ない暗室環境下と異なる認識を与える恐れがある²⁾³⁾.そのため,影響を受ける投影 面の光学的状態(照度や反射率)を考慮した投影像の補正手法が提案されている.簡便な方 法として,Grossberg⁴⁾や Fujii⁵⁾らは投影面に影響を与える周囲からの光量を見積もり,相 当する画素値をプロジェクタの入力画像値から差し引く補正手法を提案した.この補正を 行うことにより周囲から投影面に差し込む光に影響されにくい画像の提示が可能であるが, プロジェクタ自身の絶対的な投影輝度範囲の考慮が欠けていて,再現した時の階調が極端 に低下してしまうケースが発生している.

この欠点を改善すべく、Ashdown[®] らは暗所環境における再現可能な色域を計算し、そ の値をもとに明所環境での画質を改善する手法を提案した.彼らはそれぞれの環境での再 現可能な色域を CIEL*u*v*空間で定義し、投影可能な範囲で明所環境下の色度を暗所環境下 の色度に近づける補正を行った.その際、補正による誤差を色差や知覚最小輝度差で決定 するなど、視覚特性も考慮した取り組みも行っている.そのため、投影される画像のカラ ーバランスを崩すことなく劣化した画質を改善することができる.このように、プロジェ クタによる投影画像の表示性能は光学的な物理量だけで評価されるべきではなく、情報を 得る側の人間の視覚特性が考慮されるべきである.そのような観点から考えると、Ashdown らの手法は人間視覚の網膜刺激を推定して、明所環境での画質劣化を改善したと言える. しかしながら、人間の視覚特性を考慮する場合、網膜レベルの反応だけでは十分ではない. 網膜に続く神経細胞では色や輝度に対する順応が生じて、画質評価に重要な影響を与える ことが分かっている。特にプロジェクタは投影面に周囲から光が差し込むことにより、絶 対的な投影輝度範囲は極端に狭くなる特性を持つ。

Fig.1 挿入

そこで我々は、周囲環境光の影響を受けた投影画像の順応を計算しつつ、投影可能な輝 度・色度範囲を考慮して補正量を決定する画質改善手段を検討した(Fig.1).順応状態での 見えは CIECAM02^{7/8/9)} を用いて順応知覚色空間での明るさ応答 J,反対色応答 ab として計 算され、明所環境下と暗所環境下での知覚応答 Jab を比較する.明所環境下での投影画像の コントラスト劣化量と色度ずれ量を Jab 空間上の差として算出する.補正量の計算としてコ ントラストの改善にはトーンマッピングを、色度のずれ補正には Ashdown らの補正手法が 適用される.両者とも再現可能な色域を考慮して補正量が計算されるため、投影される画 像のバランスを崩すことなく劣化した画質を改善することができる.ここで、正確な順応 の計算と投影可能な輝度・色度範囲の把握のため、周囲から光が差し込む光量や表示画像 の輝度は投影面を監視する CCD カメラの出力を用いた.カメラ出力は予め三刺激値の絶対 値との換算が可能な校正を施しており、投影画像による反射光や周囲環境光などを全て絶 対三刺激値で表現可能としている.最終的な補正の効果を確認するために、両眼隔壁によ る一対比較が可能な再現システムを構築して、主観評価実験を行っている.

2 順応モデルを用いた画質改善手法

Fig.2 挿入 本論文では周囲環境光によって劣化した投影画像にコントラストと色再現の補正を加 えることで、周囲環境光がない暗所環境での見えに近づけることを目標としている. Fig. 2 に手法の全体の流れを示す.まず周囲環境光が存在する明所環境での投影画像の見えを正 確に推定するために、周囲環境光が投影面に及ぼす光量を CCD カメラで測定する.順応に 対応した見えは、投影される画像に測定された周囲環境光を加算して、CIECAM02 で推定 される.この時、順応は絶対輝度量に対して計算されるため、本手法では先に、CCD カメ ラの出力と放射輝度計での三刺激値との換算関係を求めておく.換算手法及びその精度評 価は 2.1 節で述べている.この換算により、投影画像及び周囲環境光は全て三刺激値の絶対 値で表現され、現状である明所環境と理想的な暗所環境での順応画像が正確に推定できる. ここで、順応計算は投影画像の平均的な輝度値に依存したコントラスト変換であるため、 通常、変換の過程で絵柄内部の詳細なエッジ情報は消失してしまう.しかし詳細エッジ情 報は画像の品質上、重要な情報であり、画質改善には必要不可欠である.そこで順応計算 の前にフィルタリング処理により、高周波成分を主とする画像と低周波成分を主とする画 像に分離して、低周波成分を主とする画像のみで順応計算を行い、詳細エッジ情報を持つ 高周波成分を主ともつ画像は保存しておく前処理を組み込んだ.画像フィルタリングの手 法を 2.2 節、順応画像の推定手順は 2.3 節に述べられている.推定によって求められた両画 像の三刺激値の差が修正すべき量となるが、CIECAM02 では明るさ応答 J、反対色応答 ab の分離された成分が計算されるので、各成分に対して修正を行う.

2.4 節では明るさ応答成分に対し、周囲環境光の影響で低下したコントラストを暗所環 境でのコントラストに近づける補正を行っている.その際、細部のエッジ情報は事前に分 離した高周波成分を活用している.色度に関する修正は2.5節で述べている.通常、色再現 範囲は暗所環境下のほうが広く、明所環境下では狭くなってしまう.そこで暗所環境での 再現範囲を照明下条件での範囲に圧縮することで、環境変化による色度のずれを最小にす るガマットマッピングを行う.この変換はプロジェクタが再現可能な範囲を網羅している ため、再現不可能な修正を抑制する効果もある.また、これら2.4節、2.5節での補正処理 を行わない場合は、元画像に戻るような条件に合わせてある.

最終的に,以上の処理を行った補正値を基に再現すべき画像を算出して,投影画像とし ての画素値変換を行うことで,照明環境の変化に適応した画質改善が可能となる.

2.1 周囲環境光の三刺激値計測

画像観察時の周囲環境光の状況により,投影面の三刺激値の分布は部分的,または全体 的に変化することが想定される.そのため CCD カメラを用いた投影面全体の三刺激値の分 布計測が必要不可欠であるが,カメラ出力から絶対的な三刺激値を直接的に算出すること は難しい.そこでまず,色彩輝度計との対応関係を求め,カメラ出力から三刺激値が換算 できるようにした.

ここでは、(5832 色) に及ぶ投影画像をプロジェクタ (EPSON EMP-TW200H,最大輝 度:274.8cd/m²) で発生させ、投影画像中心の三刺激値 XYZ_{pj}を色彩輝度計 (Minolta CS-100A) で、RGB_{cam}を3板式カラーCCD カメラ (TOSHIBA JK-TU52H) で計測した.対応関係は (1) 式に示す主成分分析に基づいた手法 ¹⁰⁾ で明らかになる.ここで、 I_0 はプロジェクタの暗出 力、 $C_{r,g,b}$ は計測された CCD カメラの画素値 R_{cam} , G_{cam} , B_{cam} に対応する非線形係数、 V_{cam} は三刺激値 XYZ_{cam}に変換する変換行列を示す.

$$\begin{bmatrix} X_{cam} \\ Y_{cam} \\ Z_{cam} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix}_{V_{cam}} \begin{bmatrix} C_r(R_{cam}) \\ C_g(G_{cam}) \\ C_b(B_{cam}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}_{I_0}$$
(1)

また、この計測ではプロジェクタに入力した画素値 R_{pj}, G_{pj}, B_{pj}と三刺激値 XYZ_{pj}の対応関係も明らかになる.この対応関係は決定した補正すべき三刺激値をプロジェクタで再現する際に用いられる.投影すべき画素値は (2) 式の逆変換を計算することで決定可能である.

$$\begin{bmatrix} X_{pj} \\ Y_{pj} \\ Z_{pj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix}_{V_{pj}} \begin{bmatrix} C_r(R_{pj}) \\ C_g(G_{pj}) \\ C_b(B_{pj}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}_{I_0}$$
(2)

この対応関係と周囲環境光が存在する場合の投影面を計測した結果から、周囲環境光の 影響を XYZ_{ill} として求めることができる.しかしながら、この計測値にはプロジェクタの 位置ずれや輝度ムラ、カメラの感度ムラが含まれている.そこで次に、暗所環境下で全面 自画像 (R,G,B=255,255,255)を投影した時の輝度分布を色彩輝度計で計測して、プロジェク タの輝度ムラをキャンセルした基準投影画像を作成する.計測は投影面上を 88 区画に分割 して行われ、それぞれの輝度が均一になうように投影画像を補正している.更にカメラの 各画素での感度ムラを補正するために、構造光パターンを投影して、投影面の位置に対す る画素と輝度の関係を明らかにしておく.最終的にプロジェクタの輝度ムラをキャンセル した基準投影画像をカメラで計測することにより、カメラにおける感度ムラの補正が行え る.

補正精度の検証のため,投影面中央部が100[lux]で照明されている環境で計測を行った. 投影面上のランダムに設定した画素位置 88 区画の三刺激値をカメラ出力から算出するとと もに,その点の三刺激値を色彩輝度計で計測して色差として算出した.結果を Fig.3 に示す が,88 区画の位置に対する平均色差ΔE₉₄は0.58 であった.この結果より,カメラによる照 明分布の正確な計測が可能であることがわかる.

Fig.3 挿入

2.2 画像フィルタリング

本手法は明所環境に順応した画像を推定して,投影されるべき画像(暗所環境)と比較 することにより画質を改善する.この改善には投影されるべき画像,特に絵柄のエッジな どの細部情報が必要不可欠であるため,順応画像を計算する前に投影されるべき画像の高 周波成分を主に持つ画像 Y_{detail}を抽出しておく.CIECAM02 で推定される順応画像は主に平 均的な画像輝度で決定されるため,高周波成分を分離しても順応の推定精度に影響を与え ることはない.

人間の視覚特性を考慮した画像の周波数分離は Retinex 理論で多くの研究がなされている¹¹⁾. Retinex では対象画像において,注目画素とその周辺画素をローパスフィルタで分離し,それぞれの輝度値の比から高周波成分の画像を抽出する.計算方法を(3)式に示すが,注目画素位置(*x*,*y*)での輝度値Y(*x*,*y*)を周辺平均輝度値Y_{local}で除算することで画像の高周波成分が抽出される.周辺平均輝度値Y_{local}は(4)式で示すように,注目画素の輝度値をローパスフィルタGで畳み込むことで求められる.

$$Y_{\text{detail}}(x, y) = Y(x, y) / Y_{local}(x, y)$$
(3)

$$Y_{\text{local}}(x, y) = (G^*Y)(x, y) \tag{4}$$

Retinex では用いるローパスフィルタによって強調される高周波成分が異なるため、好ま しいローパスフィルタを決定する統計的評価マップがJobson らにより提案されている¹²⁾¹³⁾. Fig. 4 に示す評価マップから、画像中の画素値平均と標準偏差の積が 6000 以上の場合、画 質はよいと判断することができる.それ以外の領域は明度、コントラストいずれかもしく は両方が不十分な領域である.評価領域内の標準偏差はコントラストを示しており、この 図から 37 以上の輝度変化をローパスフィルタで抽出可能であると好ましいことがわかる. 柄の模様と,低周波成分の領域エッジを明確に分離することが難しい.そこで,エッジ保 存型ローパスフィルタであるバイラテラルフィルタ^{13,14)}を用いて両者の正確な分離を行う. バイラテラルフィルタリングは (5) 式で示される.ここでfは注目画素値, ¢は周辺画 素値, x, yは注目画素座標, *G*は周辺画素座標を表し,通常のガウシアン分布に画素値ごと の重みづけが行われている.

$$G(x, y) = k^{-1} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\delta(\phi, \mathbf{f})}{\sigma_r}\right)^2\right) \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{d(\xi, x, y)}{\sigma_d}\right)^2\right)$$
(5)

$$k(x, y) = \int \int \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\delta(\phi, \mathbf{f})}{\sigma_r}\right)^2\right) \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{d(\xi, x, y)}{\sigma_d}\right)^2\right) d\xi \tag{6}$$

$$\delta(\phi, \mathbf{f}) = \delta(\phi - \mathbf{f}) = \|\phi - \mathbf{f}\| \tag{7}$$

$$d(\xi, x, y) = d(\xi - (x, y)) = ||\xi - (x, y)||$$
(8)

(5) 式を詳しく見ると,基本フィルタであるガウシアン分布に対して注目画素と周辺画素の 画素値を比較する関数が重みづけられている.この関数によって周囲と注目画素の輝度変 化がしきい値以下である場合だけ平均化処理を行うため,バイラテラルフィルタリングは エッジ保存が可能となる.(6)式は正規化関数であり,(7)式は画素値の差分計算,(8)式 は注目画素と周辺画素の距離を表す.

ここで重み計算を行う偏差 σ_r と距離計算を行う偏差 σ_d を決定しなければならない. 偏差 σ_r の決定には (9) 式と Jobson らによる 37 以上の輝度変化という結果を用いる. そのため x=0 を中心に線形に減少する (9) 式の三角波関数を用いて,ガウシアン分布を近似する.

$$g_{t}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} 1 - \frac{\delta(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{\sigma_{s}} & |\mathbf{x}, \mathbf{y}| \le \sigma_{s} = 37\\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$
(9)

Fig4 挿入

$$g_{g}(\delta(\phi, \mathbf{f})) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\delta(\phi, \mathbf{f})}{\sigma_{r}}\right)^{2}\right)$$
(10)

ここで σ_s は閾値を表し,式 (5), (6) に含まれる重み計算式 (10) のガウス関数に近似することで定数 σ_r を求める¹⁴⁾.式 (9) を式 (10) でのガウス関数に近似する場合,定数 σ_s を用いて $\sigma_s = \sqrt{5}\sigma_r$ と表すことができ, $\sigma_r = \sigma_s / \sqrt{5} = 17$ となる.

この重みを設定することにより,注目画素と周辺画素での画素値の差分が閾値よりも大き い場合には平滑化されず,閾値以下の場合は平滑化処理が施される.

次に距離計算を行う偏差 σ_d は CIECAM02 で定義されている 10°視野から計算して求める.本研究では幅 600mm のスクリーンに 800×600 画素で投影された画像を 600mm 離れて 観測するため、1°視野は 15 (pixel/degree) となる.よって 10°視野は 150pixel であり、空間窓に $4\sigma_d$ まで含まれると考えると、 $\sigma_d = 150/2/4 \Rightarrow 18$ (pixel) となる.

これらの値を元にバイラテラルフィルタを CIECAM02 の前処理として行っておき,暗所環境と明所環境それぞれの順応画像を求める.

2.3 順応モデルによる心理量の算出

人間の知覚感度は順応する観察時の照明環境によって異なる. 2.1 節で周囲環境光を計 測したことにより,投影画像のみの順応だけでなく,周囲環境光を含めた順応を求めるこ とができる.順応を考慮した視覚モデルは CIECAM97s に始まり,近年,Moroney らが色 順応に対応した CIECAM02 を発表した⁸⁾. CIECAM02 は人間の目の順応を厳密に考慮した モデルであるが,色単体に対するモデルのため,画像への適用対応がなされていない.そ のため CIECAM02 を画像に対して適応した iCAM06¹⁶⁾ が提案されている.しかし,iCAM06 では CIECAM02 の簡略化や,フィッティング処理が行われており,順応を厳密に考慮した 処理を行っているとは必ずしもいえない.そこで我々は,CIECAM02 の処理に画像処理的 な拡張を行うことで,順応を厳密に考慮した見え推定を行う.

CIECAM02 を用いて順応予測を行う条件として、観察環境、順応輝度値、順応度合い を定義する必要がある. 各条件とも CIECAM02 の規格に則っており、今回の設定環境での 条件を以下に述べる. 観察環境は出力画像を含めて最も明るい輝度値と最も暗い輝度値の 割合から定義され、今回の実験環境では、薄暗い観察環境と定義し、F = 0.9 とする. 順応 輝度値と順応度合いは明所・暗所環境でそれぞれ異なる. 本研究では順応輝度値 L_Aをプロ ジェクタ出力画像の平均輝度値として、その値は最大出力の 20%とする. 実際の観察環境 は平均輝度値に周囲環境光が加わるため、プロジェクタの最大投影輝度 (274.8[cd/m²])*0.2 +周囲環境光となる. 観察環境における順応度合い D は以下の (11) 式から求めることがで きる.

$$D = F\left[1 - \left(\frac{1}{3.6}\right)e^{\left(\frac{-L_A - 42}{92}\right)}\right]$$
(11)

ここで、Fは観察環境から決定される定数、LAは順応輝度値を示す. 定数 F は観察環境に

より決定され,薄暗い観察環境下での0.9を採用する.周囲環境光が存在しない暗所環境での順応度合いをD₁,周囲環境光が存在する明所環境下での順応度合いをD₂とそれぞれ表し,順応後の知覚量Lc,Mc,Scは以下の式で表わされる.

$$\begin{bmatrix} L\\ M\\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624\\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061\\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X\\ Y\\ Z \end{bmatrix}$$
(12)

$$\begin{bmatrix} L_{c} \\ M_{c} \\ S_{c} \end{bmatrix}_{D_{1}} = \begin{bmatrix} \frac{Y_{w}}{L_{w}} D_{1} + 1 - D_{1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Y_{w}}{M_{w}} D_{1} + 1 - D_{1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Y_{w}}{S_{w}} D_{1} + 1 - D_{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix}_{D_{1}}$$
(13)

$$\begin{bmatrix} L_{c} \\ M_{c} \\ S_{c} \end{bmatrix}_{D_{2}} = \begin{bmatrix} \frac{Y_{w} + Y_{ill}}{L_{w}} D_{2} + 1 - D_{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Y_{w} + Y_{ill}}{M_{w}} D_{2} + 1 - D_{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Y_{w} + Y_{ill}}{S_{w}} D_{2} + 1 - D_{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix}_{D_{2}}$$
(14)

ここで、XYZは観測される三刺激値であり、L_w, M_w, S_wは周囲環境光が存在する環境下での プロジェクタ最大輝度値を (12) 式を用いて順応知覚色空間で表したもの、Y_wとY_{ill}はそれ ぞれプロジェクタと周囲環境光の輝度値を表す. 順応後の知覚量は更なる数学的な変換で 順応知覚色空間 Jab に写像される.

Fig.5 挿入 Fig.6 挿入 各環境での輝度変化に対する明るさ応答Jの知覚変化をFig. 5 に示す. 周囲環境光が存 在しない暗所環境に比べて周囲環境光が存在する明所環境下では知覚できる明るさ応答の 幅が狭まっており、トーン変化における傾きも低くなっていることがわかる. Fig. 6 は反対 色応答 ab に対する知覚変化を示す. 各点はプロジェクタが発光できるレッド (R), グリー ン(G),ブルー(B),シアン(C),マゼンタ(M),イエロー(Y)の最大値をプロット したものであるが、同様に暗所環境に比べて明所環境下では反対色応答の範囲が狭まって いることがわかる.この知覚量をもとに、周囲環境光が存在する明所環境下でも周囲環境 光が存在しない暗所環境の知覚に近づけるような補正を行う.以下 2.4 節では明るさ応答補 正に関して、2.5 節では反対色応答の補正に関して述べる.

2.4 明るさ応答補正

Fig.7 挿入

Fig.8 挿入 Fig. 5 で明らかなように、周囲からの環境光が存在すると明るさ応答が低い領域でのコ ントラストが低下する.本節ではこのコントラスト低下を改善する明るさ応答補正を行う が、低下領域における平均的な輝度のトーンを補正するマッピングと、細かな絵柄などを 強調する処理を分けて考えなければならない.そこで本研究では Fig.7 に示すように、予め 分離された入力画像のうち、低周波成分を主に持つ画像から計算した順応画像の明るさ応 答成分Jを求め、トーン補正処理を行う.補正処理後、高周波域画像との再合成を行い、コ ントラストが改善された出力画像を得る.低周波成分を主に持つ画像に施すトーンマッピ ングは (15) (16) 式で、経験的に決定した.

$$J_{D1,g} = J_{D1}^{\gamma} \tag{15}$$

$$\gamma = \frac{\log(2J_{D1} - J_{D2})}{\log(J_{D1})}$$
(16)

 J_{D1} , J_{D2} はそれぞれ明所,暗所環境での低周波成分を主に持つ画像に対する順応を予測した結果であり,トーンマッピングを行った補正結果 $J_{D1,g}$ は Fig. 8 のようにコントラストが改善される.

2.5 ガマットマッピングによる反対色応答補正

次に低周波成分を持つ画像から計算した順応画像の色相成分 ab の補正について述べる. 明所環境下で投影画像を観察すると,色が褪せて見える.これは,一般的に周囲環境光が 白色で,加算されることにより反対色応答が白色点 (a=b=0) に近づくためである.そこで, 周囲環境光が存在しない暗所環境下での反対色応答 ab 分布を理想値として,周囲環境光が 存在する場合での反対色応答 a'b'分布を理想に近づける補正を行う.本研究では補正方法と して, Ashdown らに提案されている最小化手法⁶を適用した.この手法は反対色応答 ab に 対して画素ごとに処理を行う.

まず周囲環境光が存在しない暗所環境での反対色応答分布を定義するために,Jab 色空間の反対色応答成分を Fig.9 左に示すような J=0 平面に射影する.これを理想的な分布として,周囲環境光が存在する環境下で投影可能な色域での反対色応答に決定し直す.反対色応答の移動に関して,反対色応答分布の形状変換が必要であり,この変換はスケール s と平行移動ベクトル (i,j) を用いて (17) 式のように表すことができる.

$$\begin{bmatrix} a'\\b' \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} a\\b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i\\j \end{bmatrix}$$
(17)

Fig.9 挿入

このスケールと平行移動を最適化解法で決定するために、反対色応答領域の変化に対する 各点の移動量をコスト関数として、反対色応答領域が縮退してもなるべく現在の各点が移 動しないような最小化問題に帰着させる. 但し各点が投影可能な反対色応答域を超えない ような制約項を使用している.本研究では反対色応答領域をレッド(R),グリーン(G), ブルー(B),シアン(C),マゼンタ(M),イエロー(Y)の最大値領域として、暗所環境 から明所環境に変化したときの、画像中の各点の変換を行った. 結果を Fig.9 右に示す.

2.6 補正した投影画像の再構築

前章までで周囲環境光が存在する明所で順応した低周波成分を主に持つ画像を明るさ応 答,反対色応答それぞれ補正した.最終的にこの補正画像をもとに,投影すべき画像を算 出しなければならない.そのためにまず,補正した低周波成分を主に持つ画像をCIECAM02 で逆変換を行うことにより,三刺激値 XYZ 画像を再生させる.次に 2.2 節で分離しておい た高周波成分を主に持つ画像を合成する.もともと順応は画像の低周波域に大きく影響す るため,原画像の高周波成分を付加しても順応を考慮した補正に悪影響を与えない.むし ろ高周波成分を最終的に合成することで,細部の見えなどが補正により劣化することを防 ぐことができる.ここで合成された画像は周囲環境光が存在するときの三刺激値であるた め,計測時に求めておいた周囲環境光輝度値を差し引くことにより,プロジェクタで投影 すべき三刺激値を最終的に求めることができる.更に,三刺激値とプロジェクタの画素値 は (2) 式で一意に決定できるため,補正を行った画像をプロジェクタで再現することが可 能となる.

3. 主観評価実験による有効性検証

3.1 実験手法

順応を考慮した提案手法の有効性確認のため主観評価実験を行った.本評価実験では, 提案手法による補正画像の比較対象として原画像(補正なし)と Ashdown らの手法での補 正画像を用いた (Fig. 10).被験者への提示画像は Fig. 11 に示す3種の画像である.実験ジ オメトリを Fig. 12 に示す.幅 600mmの平面に400×300 画素の画像を縦横2枚×2枚で投 影し,左側を暗室環境,右側を照明環境として両眼隔壁で600mm離れて観測する.

評価方法にはサーストンの一対比較法 (ケース V) を用いた¹⁷⁾.まず被験者に各環境へ 順応させるため、プロジェクタの白を点灯した状態で投影面を 1 分間注視させる.次に、 左側に補正前の同じ原画像 2 枚、右側に比較画像 2 枚を提示する.被験者には左側の暗室 環境下での原画像に対し、右側に提示された 2 枚の比較画像からより全体の色の見えが近 い画像を選択するよう指示した.右側の照明が存在する環境光は相関色温度 5000K の昼光 を代表する補助イルミナント D50 とし、環境光量は 50[lux], 100[lux]の 2 種とした.実験に 使用した投影面は拡散特性を持つ紙であり、100[lux]の照明が加算されることで投影画像の 平均輝度値は、80[cd/m²]以下となる.平均輝度値が 80[cd/m²]以下では、コントラストに対 する閾値がほぼ一定となり、もし投影面の平均輝度値が 80[cd/m²]以上の場合、人間のコン トラストに対する感度は大幅に増加する¹⁸⁾.これは照明下の投影画像に対して知覚するコ ントラストは極端に低下することを意味するため、本実験では上記のような設定で実験を 行った.このような各照明環境下において被験者 10 人が 3 枚の画像に対して各々3 通り、 照明環境 2 種、全 18 通りの画像評価を行った.

3.2 結果と考察

Fig.10 挿入

Fig.11 挿入

Fig.12 挿入 評価結果を Fig. 13 に示す. 50[lux]においては、すべての画像に対して提案手法の評価が 高くなった.しかしながら、100[lux]において、提案手法は Image2 に対してオリジナル画像 よりも低い評価となった.また、従来手法の評価は Image3 を除いてすべて低い評価となっ た.評価値に対して一般化線形モデル (GLM)を用いた分散分析¹⁹⁾を行った結果、照明環 境および画像の違いによる結果への影響はなく、各手法による評価値の z スコアは 5%水準 で有意差が認められた.

全体的に従来手法での評価が低い理由として、手法の目的の違いが考えられる.従来手 法の目的は主に投影面の色違いの補正であり、出力可能な明るさ成分の色域の中に収まる よう明るさ成分を最適化処理している.そのため、最終的に知覚される明るさ成分は保存 されず、特に周囲環境光よりも暗い部分では明るさ成分に対する色域圧縮の度合いが高く なり、コントラストが低下する.

100[lux]で照明された環境下において提案手法での Image2 が低い評価であったのは、画 像と周囲環境光の加算された輝度値が 80 [cd/m²]を超えているためと考えられる.実際, Image2 における中央部分 (女性の白い服など) はプロジェクタや周囲環境光の照度斑の影 響もあり、部分的に 80 [cd/m²]を超えていた. 順応は最も輝度が高い領域に多大な影響を受 けるため、急速に周辺のコントラストや色知覚が変化したと考えられる. CIECAM02 での 条件設定はあくまでも平均輝度で行われているが、実際の画像ではコンテンツの内容にも 大きく左右されることが明確となった.

Fig13 挿入

4. まとめ

本研究では、様々な周囲環境光の影響による投影画像のみえを改善するために、人間の 順応効果を考慮した視覚モデル (CIECAM02) を用いて画質を改善する手法を提案した.

提案手法では,暗室環境と周囲環境光がある環境でそれぞれ順応した場合の反対色応答 と明るさ応答を CIECAM02 から算出し,周囲環境光で劣化した画質を暗室環境下の見えに 近づける補正を行った.補正は明るさ応答と反対色応答のそれぞれ別々に処理して,周囲 環境光下で投影可能な出力を得ることができる.また,変化する照明環境をカメラから計 測しているため,様々な照明環境下において耐えうるシステムであると考える.

提案手法の有効性確認のために主観評価実験を行い,暗室環境における投影画像の見え と照明環境下における補正画像の見えの近さを評価した.その結果,提案手法は補正なし の画像や従来手法よりも高い評価を得た.しかし,高輝度領域が多い画像に対しては局所 的に偏りができる補正となり,画像全体の知覚に不自然さが生じてしまった.

今後の方針として、輝度偏りが多い画像に対する見えの不自然さを改善するため、画像 のコンテンツに依存した処理を行う必要がある.また、より明るい部屋や特定の着色がな された投影面など、多様な環境下で本手法を適用するためには更に補正可能な範囲を広げ た投影システムが必要となる.一つの解法として複数台のプロジェクタとカメラを用いた マルチプロジェクションシステムが有用と考えられるため、複数プロジェクタの制御を含 め、今後更なる高度な画質改善を実現していく.

【参考文献】

1) http://www.microvision.com/pico_projector_displays/.

2) R. Mantiuk, S. Daly, and L. Kerofsky, ACM Transactions on Graphics (TOG), **27**, **3**, pp. 1-10 (2008).

 Grundhofer and O. Bimber, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 14, pp. 97-108 (2008).

4) M.D. Grossberg, H. Peri, S.K. Nayar, and P.N. Belhumeur, Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, **1**, pp. 452-459 (2004).

5) K. Fujii, M. Grossberg, and S. Nayar, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, **2**, p. 1180 (2005).

6) M. Ashdown, T. Okabe, I. Sato, and Y. Sato, Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW'06), Projector-Camera Systems (PROCAMS), p. 6 (2006).

7) M.D. Fairchild and G.M. Johnson, IS&T/SID 10th Color Imaging Conference, pp. 33-38 (2002).

8) N. Moroney, M. Fairchild, R. Hunt, C. Li, M.R. Luo, and T. Newman, IS& T/SID 10th Color Imaging Conference, pp. 23-27 (2002).

9) CIE Publication 159, (2004).

10) N. Tamura, T. Ishii, N. Tsumura, Y. Yoshida, Y. Yamamoto, and Y. Miyake, Proc Asia Display/IDW, pp. 1545–1548 (2001).

11) E.H. LAND and J.J. McCANN, Journal of the Optical Society of America, 61, pp. 1-11 (1971).

12) D.J. Jobson, Z. Rahman, and G.A. Woodell, Visual information processing XI, **4736**, pp. 25-35 (2002).

13) 竹松祐紀, 中口俊哉, 津村徳道, 三宅洋一, 日本写真学会誌 67, pp. 410-416 (2004).

14) G. Petschnigg, R. Szeliski, M. Agrawala, M. Cohen, H. Hoppe, and K. Toyama, ACM Transactions on Graphics, **23**, pp. 664-672 (2004).

15) C. Tomasi and R. Manduchi, Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 839-846 (1998).

16) J. Kuang, G.M. Johnson, and M.D. Fairchild, Journal of Visual Communication and Image Representation, **18**, pp. 406-414 (2007).

17) L.L. Thurstone, Psychological review, 34, pp. 273-286 (1927).

18) J. A. Ferwerda, S. N. Pattanaik, P. Shirley, and D. P. Greenberg, Proceedings of the 23rd annual conference of Computer graphics and interactive techniques, ACM, pp. 249-258 (1996).

19) R. Rajae-Joordens and J. Engel, Displays, 26, pp. 1-7 (2005).

Figure captions:

Fig.1	Color compensation under lighting condition.
Fig.2	Proposed formulation of the compensation.
Fig.3	Estimated lighting condition (100 lux).
Fig.4	Image quality curve proposed by Jobson ¹²⁾ .
Fig.5	Lightness of projector output.
Fig.6	Color gamut of projector output.
Fig.7	Flowchart of tone mapping and detail enhancement.
Fig.8	Tone mapping of projection under the lighting condition.
Fig.9	Compression of chromatic channels.
Fig.10	Output under experimentation environment (Image2).
(a)	Original image under the dark condition.
(b)	Original image under the lighting condition.
(c)	Compensated image by proposed method under the lighting condition.
(d)	Compensated image by conventional method under the lighting condition.
Fig.11	Thumbnails of experimental images.
(a)	Image1
(b)	Image2
(c)	Image3
Fig.12	Experimental setup.

Fig.13 Subjective scores in appearance by scene and illumination.



Fig. 1 Color compensation under lighting condition.



Fig. 2 Proposed formulation of the compensation.



Fig. 3 Estimated lighting condition (100 lux).



Fig. 4 Image quality curve proposed by Jobson ¹²).



Fig. 5 Lightness of projector output.



 $O_{ab_{D1}}$ Projection gamutunder dark conditionWhite point = [250.8, 274.8, 263.4] $★ <math>ab_{D2}$ Possible projection gamutunder lighting conditionWhite point = [260.7, 284.8, 269.0]





Input tristimulus value XYZ

Fig. 7 Flowchart of tone mapping and detail enhancement.



Fig. 8 Tone mapping of projection under lighting condition.



Fig. 9 Compression of chromatic channels.







(b) Original image under lighting condition.



(c) Compensated image by proposed method under lighting condition.

(d) Compensated image by conventional method under lighting condition.

Fig.10 Output under experimentation environment (Image2).







Image1

Image2

Image3

Fig.11 Thumbnails of experimental images.



Fig. 12 Experimental setup.



Fig. 13 Subjective scores in appearance by scene and illumination.