

人間の視覚特性を考慮した投影画像の光学的補正

マーク アッシュダウン[†] 佐藤いまり^{††} 岡部 孝弘^{†††}佐藤 洋一^{†††}

Perceptual Photometric Compensation for Projected Images

Mark ASHDOWN[†], Imari SATO^{††}, Takahiro OKABE^{†††}, and Yoichi SATO^{†††}

あらまし 実世界内の様々な場所にプロジェクタで画像を投影するとき、不均一な反射特性をもつ投影面や環境光などの影響により、正しい色で表示可能な画像のコントラストが制限されてしまうという問題がある。これに対して本研究では、観測者に知覚されにくいような色成分と輝度成分の変動を積極的に利用して、よりコントラストの高い画像を表示することを可能にする手法を提案する。提案手法では、画素ごとに、原画像の色成分を厳密に表示可能な輝度の範囲を求めたのち、人間の視覚特性に関するモデルに基づいて、色成分と輝度成分が許容し得る誤差を計算する。こうして得られた各画素の輝度範囲、及び、色成分と輝度成分の許容誤差を考慮し、かつ、原画像から観測画像への変換が隣接画素間で過度に変化しないようにして、観測画像のコントラストを最大化するような光学的補正を行う。本論文では、提案手法のアルゴリズムを説明し、様々な被投影面を用いた実験により提案手法の有効性を示す。

キーワード プロジェクタ、キャリブレーション、光学的補正、人間の視覚特性

1. ま え が き

従来、プロジェクタを利用する際には照明を落とし、部屋に設置した専用スクリーンが用いられることがほとんどであった。しかしながら、プロジェクタの小型化、低価格化、高輝度化などが進んだ結果、オフィスや居間の壁などのように、必ずしも暗室内の専用スクリーンのように理想的な特性をもつとはいえないような場所への画像投影を実現する技術に注目が集まっている [1], [9]。

例えば映画業界では、劇場用長編作品をデジタルファイルとして映画館に配信しデジタルプロジェクションで高精細な投影を実現する技術の開発が進められている一方で、映画館ではない場所におけるデジタルシネマ作品を配信させることの重要性も主張され

てきている [3], [7], [14]。前者の高精細な投影を目指すデジタルシネマ技術の開発では、視覚的に遜色なく映像を圧縮する技術や製作者の意図する色再現を行う統一色空間管理手法など、反射率が均一な専用スクリーンを対象として開発されている。

一方、オフィスや居間の壁などをスクリーンとして利用する場合、投影される面（投影面）自体に模様や汚れがあったりと専用スクリーンのように均一かつ高い反射率をもつことはまれであり、環境光の色や明るさなどの影響もあり、投影される画像と投影された結果とが大きくずれてしまうという問題が生じる。このような問題に対して、プロジェクタへの入力（入力画像）とカメラを用いて観察される投影面上の出力（観察画像）との関係をあらかじめ求めておき、その関係に基づき入力画像を補正してずれを軽減するような手法が提案されている。

Grossberg らによる手法 [5] と Fujii らによる手法 [4] では、観察画像の RGB 値は、入力画像の RGB 値を線形変換したものに環境光成分を足し合わせたものとして表現され、この関係をもとに、投影したい画像（以下、原画像）の RGB 値と観察画像の RGB 値が一致するように、プロジェクタへの入力画像を補正す

[†] マサチューセッツ工科大学, 米国
Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts
Avenue, Cambridge, MA 0213, USA

^{††} 国立情報学研究所, 東京都
National Institute of Informatics, 2-1-2 Hitotsubashi,
Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8430 Japan

^{†††} 東京大学生産技術研究所, 東京都
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 4-
6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

るという処理が用いられている。これにより、投影面の反射率のばらつきが比較的小さく、環境光の影響も少ない場合には良好な結果が得られることが示されている。

しかしながら、基本的にこれらの手法では、プロジェクタへの入力画像の色と明るさの範囲（例えば、24ビットRGB画像であれば各バンド0~255）を投影面で観察可能な色や輝度の範囲に対応づけるという考え方に基づいている。そのため、投影面の一部の反射率が大きく異なる場合や環境光の影響が大きい場合には、投影面の低い反射率をもつ部分では補正に必要とされる色や輝度がプロジェクタの出力範囲を超えてしまい補正誤差も大きくなる。更に、誤差の大小が投影面の各部分で異なるため、誤差パターンが観察画像上で見えてしまうという問題も抱えていた。

これに対し、Grossbergらは、入力画像の最大輝度を調整して観察画像の明るさの範囲を制限することにより、観察画像における最大誤差が軽減されることを示している[5]。しかしながら、補正誤差の軽減を優先した場合には、観察画像の明るさや色の範囲を制限して画像のコントラストを下げるのが有効であるのに対し、観察画像のコントラストを優先する場合には、補正誤差の許容範囲を広げて最大輝度を高く設定しなければならないというトレードオフが存在する。どの程度の補正誤差を認めて観察画像の明るさ範囲を調整するのかについて具体的な方法は示されていない。

これに対し、本研究では、不均一な反射率をもつ投影面や環境光の影響のみならず、原画像の内容も考慮した上で、良好な画質が得られるような補正を実現する手法を提案する。Grossbergら[5]やFujiiら[4]の提案した光学補正では原画像の内容が考慮されていなかったのに対し、提案手法では原画像の内容に基づいて補正の仕方を調整するコンテンツ依存型の補正となっている点が大きく異なる。

例えば、投影面上の一部が低い反射率をもつとすると、この部分では観察画像を明るくすることができない。従来手法では、ユーザが指定した最大輝度に基づき投影面全体の補正誤差を考えるのに対し、提案手法では、投影面の一部の反射率が低いような場合においても、その部分に投影する画像の明るさがもともと低いのであれば、補正誤差は小さいといった臨機応変な判断が可能となる。これにより、入力画像全体の明るさを必要以上に制限することなく良好なコントラストをもった観察画像を投影面に映し出すことができる。

更に、人間の視覚特性に基づき、入力画像を補正する際に、観察者にとって違和感を生じないずれを積極的に認めることにより、補正誤差を観察者に気づかれることなく投影される画像のコントラストを可能な限り拡大できる点が大きな特長となっている。この拡張は、先に述べた補正誤差と観察画像のコントラストとのトレードオフを調整する具体的な指標を示すことにつながる。

これまでにも、プロジェクタの光学補正に人間の視覚特性を考慮するという試みが、ほぼ同時期にMajumderら[8]とWangら[12]によって報告されている。しかしながら、タイル型に組み合わせた背面投影型のプロジェクタシステムのムラの低減を目的としたMajumderらの手法では、原画像の内容は考慮されておらず、視覚特性に関するモデルとしても非常に簡略化されたもののみが利用されていた。

Wangらの研究[12]では、原画像の内容と人間の視覚特性を考慮して計算されたしきい値マップ(Perceptually-based Threshold Map [10])に基づき、観察者にとって知覚されにくい誤差を積極的に用いて画像のコントラストを上げるというアルゴリズムが提案された。しかしながら、この手法はカラー画像ではなく白黒濃淡画像のみを扱うことができ、環境光は存在しないという仮定に基づいていた。また、画像の補正に関しても、提案手法のように画像の各部分ごとに補正の仕方を変えるのではなく、画像全体の明るさを等しく調整するという比較的簡単な処理のみが用いられていた。

2. 提案するプロジェクタ・カメラシステム

本研究では、人間の視覚特性に基づき、投影面の模様などの反射特性の不均一性、室内の蛍光灯などの環境光の影響、プロジェクタ出力の不均一性を補正して、知覚的に原画像に近い観察画像を投影面に実現することを目指す。

提案手法は、静的な環境を想定し（環境光は一定）、投影面は完全拡散面であり視線方向による見えの変化はないと仮定する。また、投影面から観察者への距離は既知とする。本研究で使用するプロジェクタは、赤、緑、青の3原色で構成され、その出力は各画素独立で投影面において加色混合されると考える。

なお、プロジェクタを用いて任意の面上に入力画像をひずみなく所望の色と明るさで投影するためには、光学的補正だけでなく幾何的補正が必要となる。こ

れに対し、プロジェクタ・カメラシステムの幾何キャリブレーションに関する研究はこれまでに多く報告されている。

本研究では特別な幾何的補正は考慮せず、投影面が平面であると仮定して、プロジェクタ画像平面と投影面のホモグラフィを求めることで幾何キャリブレーションを行っている。以後、プロジェクタの画像平面と投影面（及びカメラの画像平面）の対応は既知として議論を進める。以下では入力画像と投影面においてカメラで観察される観察画像との関係式を導き、提案する光学補正手法を説明する。

2.1 原画像と投影面で観察される明るさの関係

提案手法では、入力画像をデバイス依存の RGB 値から Y_{xy} 値 (Y は輝度値, xy は色信号^(注1)) に変換して光学補正を行っていく。一般に、プロジェクタ出力は入力に対して線形な値を示さない。また、空間的に一様であることが知られている [8]。そこで、プロジェクタへの入力を変化させたときに、投影面上の一点の輝度を測光計で計測することにより、図 1 に示す応答関数を得た。プロジェクタ応答関数は機種により異なるため、異なるプロジェクタを利用する際には、新たにプロジェクタ応答関数を獲得する必要がある^(注2)。

以下では、入力 RGB 値にプロジェクタ応答関数の逆関数をかけた後の RGB 値 \tilde{i} をプロジェクタへの入力とする。

Stone ら [11] は、 3×3 の変換行列を用いて、プロジェクタ入力となる RGB 値と投影面において観察される XYZ 値 (XYZ 色空間で定義される色) との関係定義している。また、Grossberg ら [5] は、同様の変換を用いて、入力画像の画素と投影面をカメラを用

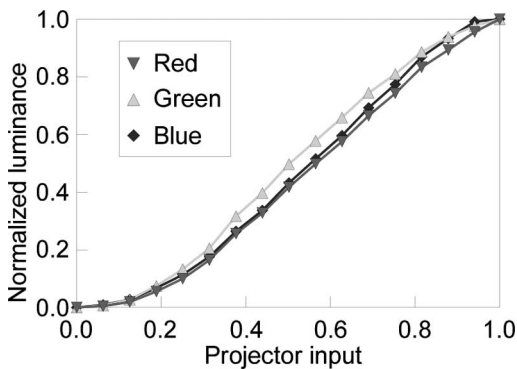


図 1 プロジェクタの応答関数

Fig. 1 Projector response functions for the projector's red, green, and blue channels, measured using a colorimeter.

いて撮影した観察画像の画素との関係を導いている。ここで、環境光の影響は、オフセットとして表現することができるため、プロジェクタ入力とカメラにより観察される明るさの関係は

$$c = M\tilde{i} + t \quad (1)$$

のように求まる。この式において、 c は投影面の対応する画素の XYZ 値, M は 3×3 の色変換行列, t は環境光の影響を示している。

なお、観察画像の色信号はカメラを用いて計測する。ここで、カメラの色信号のキャリブレーション (RGB 色空間から XYZ 色空間) には、測光計を利用した。カラーチャートの色をカメラと測光計の両方で計測して、Ilie ら [6] と同様にして、RGB から XYZ の二次の写像を求めた。

更に、 c に対応する Y_{xy} 値は標準的な色変換を用いて求めることができる： Y_{xy} 空間における Y は XYZ 値の Y に対応し, xy は $x = \frac{X}{X+Y+Z}$, $y = \frac{Y}{X+Y+Z}$ のように求まる。また、その逆変換は $X = x\frac{Y}{y}$, $Y = Y$, $Z = (1 - x - y)\frac{Y}{y}$ となる。

式 (1) で記述される色空間の変換は、投影面のテクスチャや環境光の影響を受けるため、投影面の各点で定義される。提案手法では、あらかじめ準備された画像パターンをプロジェクタを用いて投影面に投影し、その明るさをカメラで観察することにより、投影面の各点について変換行列 M と環境光 t の 12 要素を求めている。変換式が 12 個のパラメータを含むこと、及び、1 回の計測で三つの拘束が得られることから、4 よりも十分に多い回数だけ計測を行うことで、最小二乗法によりパラメータを推定している。

2.2 光学補正の手順

提案手法では、原画像を Y_{xy} 値に変換し、以下の手順に基づき光学補正を行っていく。以下、原画像の輝度 Y , 色信号 $e = (e_x, e_y)^T$ とする^(注3)。

(1) 物理的な輝度範囲の設定：観察画像の各画素において、原画像の色信号 e を満たす輝度の範囲 $[L, H]$ を求める (図 10 参照)。 L は最小, H は最大輝度を示す。

(注1): クロミナンス: ある色と同輝度の参照色との差異。

(注2): 提案手法では、対応した応答関数を利用するほかは補正手順は変わらないため、提案手法を容易に様々なプロジェクタに適用することができる。

(注3): プロジェクタ投影により投影面において実現可能な最大輝度と最小輝度の平均を求め、この範囲内に原画像が収まるようにスケール調整を行うことで原画像の輝度 Y を物理量 (cd/m^2) で表現している。

(2) 色しきい値による輝度範囲の拡張：色信号 e に対する誤差の許容範囲（色しきい値）に基づき、輝度範囲を仮想的に広げる $[L', H']$ 。

(3) 輝度しきい値による輝度範囲の拡張：輝度に対する誤差の許容範囲（輝度しきい値）に基づき、上記で求めた輝度範囲を更に広げる。色しきい値、輝度しきい値により拡張された輝度範囲を $[L'', H'']$ とする。

(4) 輝度変換：原画像の輝度 Y を、求めた拡張輝度範囲 $[L'', H'']$ に収まるように調整する。この際、観察者にとって違和感が生じない程度に空間的に非一様な写像を認めることにより、原画像のコントラストを保ちつつ限られた輝度範囲に収めていく。

(5) 補正画像の生成：写像された輝度 Y' に基づき色信号を求め、式 (1) の逆変換により光学補正を施した入力画像（以下、補正後にプロジェクタへの入力となる画像を補正画像と呼ぶ）を求める。以下、各手順を詳しく説明する。

3. 人間の視覚特性に基づく輝度範囲の拡張

3.1 物理的な輝度範囲の設定

実空間内の様々な場所にプロジェクタで画像を投影する場合、投影面の不均一な反射特性や環境光の影響により、プロジェクタ投影により投影面で観察可能な色信号の領域（色領域）も限られてしまう。本節では、観察画像の各画素に対して色領域を求め、原画像の色信号が領域外となる場合には、色領域へのクリッピング処理を行い、色信号 e を満たす輝度の範囲を求めていく。

式 (1) 及び XYZ から Y_{xy} への変換により、ある RGB 値 \tilde{i} が入力として与えられれば、対応する XYZ 値と Y_{xy} 値を求めることができる。そこで、彩度が最大となる入力 RGB 値、 $\tilde{i} = (1, 0, 0)^T, (0, 1, 0)^T, (0, 0, 1)^T$ それぞれに対して、対応する Y_{xy} 値を求めることにより、 xy 空間において色領域を定義する 3 頂点 (r, g, b) が求まる（図 2(a)）。同様な手順により、輝度が最小または最大となる RGB 値 $\tilde{i} = (0, 0, 0)^T, (1, 1, 1)^T$ に対応する色信号 $(1, h)$ も求めておく。

ここで、原画像の色信号 $e = (e_x, e_y)^T$ が求めた色領域内に存在する場合は e を用いて、色領域外となる場合には色領域を形成する 3 辺のうち e からの距離が最小の点を e として、この色信号を満たす輝度の範囲を求めていく（図 2(a)）。

3.2 e に対応する最大・最小輝度 $[L, H]$ の算出
色信号 e は、XYZ 色空間ではベクトル $d = (e_x, e_y,$

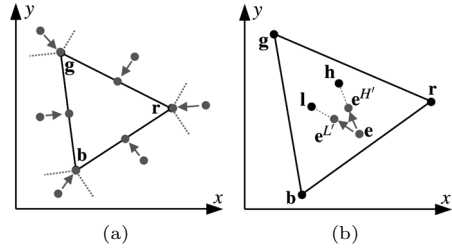


図 2 色信号のクリッピング及び色信号誤差のしきい値
Fig. 2 Chrominance clipping and chrominance threshold.

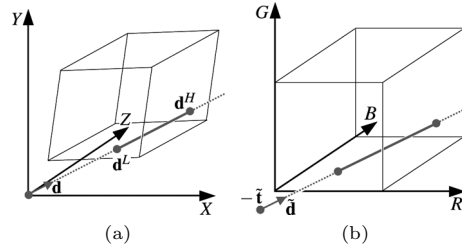


図 3 XYZ 及び RGB 空間における出力領域：(a) XYZ 色空間におけるベクトル d 上の点は同じ色信号をもつ。(b) RGB 空間での議論を通して、出力領域と d との交点の導出する。

Fig. 3 Gamut in XYZ and RGB color spaces. (a) Any multiple of d in XYZ space will have the desired chrominance. (b) We perform the intersection between line and projector gamut in RGB space.

$1 - e_x - e_y)^T$ に対応する。すなわち、このベクトル上の点 $sd, s \geq 0$ は、すべて同じ色信号 e をもつことになる。式 (1) より次式を得る：

$$sd = M\tilde{i} + t. \quad (2)$$

ここで、 $\tilde{d} = M^{-1}d, \tilde{t} = M^{-1}t$ とすると、

$$\tilde{i} = s\tilde{d} - \tilde{t}. \quad (3)$$

以下では、RGB 色空間での議論を通して、最大・最小輝度に対応するベクトル \tilde{d} のスケール (s^L, s^H) を求めていく。RGB 空間において、すべての \tilde{i} を含む領域は単位立方体を形成し、色信号 e に対応し最小輝度をもつ点は $\tilde{i}_R = 0, \tilde{i}_G = 0, \tilde{i}_B = 0$ の面とベクトル \tilde{d} との交点となることが分かる（図 3(b)）。この交点に対応するスケール s は、 $s_R = \tilde{t}_R / \tilde{d}_R, s_G = \tilde{t}_G / \tilde{d}_G, s_B = \tilde{t}_B / \tilde{d}_B$ のように求まる。これらの点のうち、 $-\tilde{t}$ からの距離が最も遠い点が色信号 e を満たしかつ最小輝度に対応する値へのスケールを示す。すなわち、

$$s^L = \max \left(\frac{\tilde{t}_R}{\tilde{d}_R}, \frac{\tilde{t}_G}{\tilde{d}_G}, \frac{\tilde{t}_B}{\tilde{d}_B} \right) \quad (4)$$

同様に、ベクトル上の点であり、最大輝度をもつ点のスケールは次式により求まる：

$$s^H = \min \left(\frac{1 + \tilde{t}_R}{\tilde{d}_R}, \frac{1 + \tilde{t}_G}{\tilde{d}_G}, \frac{1 + \tilde{t}_B}{\tilde{d}_B} \right) \quad (5)$$

したがって、 $d^L = s^L d$ 、 $d^H = s^H d$ の 2 点を求め、それぞれに対応する輝度 L 及び H を求めることができる。

3.3 色信号における誤差の考慮

人間の視覚特性に基づき、色信号に対する誤差の許容範囲（色しきい値）を考慮することにより、輝度範囲 $[L, H]$ を仮想的に広げていく。まず、図 2(b) に示すように、 xy 色空間において、色信号 l （最小輝度を導く色信号）と色信号 h （最大輝度を導く色信号）の方向に、 e から色しきい値距離分離れた点 ($e^{L'}$, $e^{H'}$) を求める。言い換えれば、 e からの距離がしきい値距離にある $e^{L'}$, $e^{H'}$ と e の色信号差をユーザは知覚することができない。前章の議論に基づき、 $e^{L'}$ を満たす最低輝度 L' と $e^{H'}$ を満たす最大輝度 H' を求めることができる。ここで、 $e^{L'}$, $e^{H'}$ は、それぞれ l , h に e より近づいているため、その輝度範囲 $[L', H']$ は $[L, H]$ よりも広くなる。本研究では、Wright らにより示された知覚可能な色誤差のデータ [13] に基づき色しきい値を決定している。

なお、前節の d^L , d^H と同様に、色信号 $e^{L'}$ ($e^{H'}$) に対応する XYZ 色空間のベクトルと出力領域との交点のうち原点に近いもの（原点から遠いもの）を $d^{L'}$ ($d^{H'}$) とする。

3.4 輝度における誤差の考慮

輝度における誤差の許容範囲を考慮することにより、上記で求めた $[L', H']$ の輝度範囲を更に広げていく。本研究では、Ramasubremanian らにより提案された輝度しきい値（Perceptually-based Threshold map [10]）に基づき、人間が知覚しない輝度差のしきい値 T を求めている。Threshold map は以下の 3 要素により構成される：

Threshold-versus-intensity function (TVI): TVI は、人間が知覚する最小輝度差を示し、対象点を中心として視野 1° 内の周辺領域の平均輝度により決定される。対象点が 80 cd/m^2 以上の輝度をもつ場合、誤差のしきい値は輝度に比例することが知られている。本研究では、室内などの一般的な環境光下における光学補正を考えているため、この場合に相当するとして TVI を求めている。

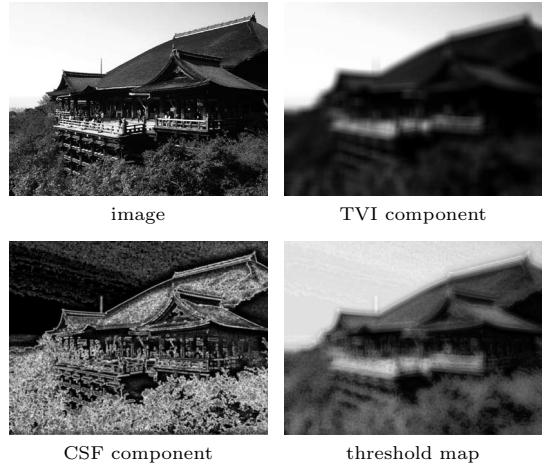


図 4 輝度差の許容範囲の推定：原画像の輝度値 Y を用いて TVI と CSF の要素を求め、それらを掛け合わせることで最終的なしきい値 T が求まる。

Fig. 4 The threshold map for an image determines how much error in luminance can be tolerated at each pixel. The luminance channel Y of the original image is used to compute TVI and CSF components which are multiplied to create the final threshold map.

Contrast sensitivity function (CSF): 画像の各領域における空間周波数に基づき求められる誤差の許容範囲を示す。空間周波数の高い領域は許容誤差も高く認められるなど、周波数の各レベルに対応した許容誤差が定義される。具体的な計算手順では、各周波数バンドに対応するコントラスト値をコントラストピラミッド手法 [2] に基づき求め、その値の重み付け和により CSF を求めている。

Visual Masking: CSF と関係して、各周波数レベル同士の打消し効果などを示す。

これらの 3 要素のうち、Visual masking は計算コストが非常に高いため、本研究では TVI と CSF の二つの値を掛け合わせたしきい値 r を求め、更に相対的な輝度しきい値 $T = (Y + r)/Y$ を求めている。図 4 に提案手法により求めた TVI, CSF 及び二つの値を掛け合わせたしきい値の例を示す。ここで、 T は輝度に対して相対的なしきい値を示し、 $T = 1.1$ は与えられた輝度に対して 10% の輝度誤差を人間が知覚できないことを示す。

人間が知覚する輝度差は輝度の対数に比例するため^(注4)、 T に基づき拡張された輝度範囲は、

$$L'' = L'/T, \quad H'' = H'T \quad (6)$$

(注4): Weber's law として知られる。

のように求まる．

3.5 プロジェクタの特性と色誤差及び輝度誤差について

プロジェクタ投影により投影面で観察可能な色や輝度の範囲はプロジェクタの特性により変化する：投影面において出力可能な色領域や輝度が最小または最大となる RGB 値に対応する色信号 (l, h) も変化し (図 2(b) 参照), プロジェクタの明るさに応じて原画像の色信号を満たす輝度の範囲 $[L, H]$ も変化する．

これに対し, Wright らの知覚可能な色誤差のデータ [13] では, 色空間ほぼ全域にわたって色信号の許容誤差が定義できることを示している．また, 輝度の誤差しきい値に関しては, 前章で説明したように Threshold-versus-intensity function (TVI) に基づき, 対象点が 80 cd/m^2 以上の輝度をもつ場合, 誤差のしきい値は輝度に比例することが知られている．

ここで, 80 cd/m^2 は暗めの室内でも観察できる明るさであり, どのようなプロジェクタであっても, プロジェクタ投影により投影面において 80 cd/m^2 以上の明るさを実現していると考えられる (注5)．

したがって, 色誤差や輝度誤差を考慮することは, プロジェクタの特性に左右されず, 輝度範囲 $[L, H]$ を常に広げる方向に作用すると考えられる．よって, 人間の視覚特性に基づき許容範囲内の補正誤差を考慮し, 限られたプロジェクタのダイナミックレンジを仮想的に広げて活用するという提案手法の特徴は, 観察画像のコントラストを高めるという意味において, 様々な特性をもつプロジェクタに対しても有効であるということができる．

4. 光学的補正のための原画像の変換

本章では, 輝度の変換を中心に, 原画像から補正画像への変換について述べる．

4.1 輝度の変換

各画素について, 原画像の輝度 Y を, 前章で計算した輝度の範囲 $[L'', H'']$ に写像することで, 補正画像を投影したときに観測される物理的な輝度 Y' を求める．これは, 原画像の輝度を, 空間的に非一様な写像で変換することに対応している．

一般に, 人間の知覚する明るさは物理的な明るさの対数に比例することから, $L = \log L'', H = \log H'',$ 及び, $Y = \log Y$ として, 対数ドメインで議論する．なお, Y は $[0, 1]$ に正規化されているものとする．ここで, 原画像の輝度 Y を, $Y' = Y(Y^h - Y^l) + Y^l$ の

ようにして, 画素ごとに定義された下限 Y^l と上限 Y^h の間に線形に写像するものとする．つまり, 輝度の変換の問題を, 二つの境界 Y^l と Y^h を求める問題として定義する．

これらの境界は, 補正画像を投影したときに観測される画像のコントラストをより高くすると同時に, 以下の拘束条件を満たさなくてはならない．

- ダイナミックレンジによる拘束: 輝度 Y' は, プロジェクタのダイナミックレンジ内に収まる必要がある．すなわち, $L \leq Y(Y^h - Y^l) + Y^l \leq H$ を満たさなくてはならない．

- 境界の一意性による拘束: 境界の輝度があたかも一様であるかのように知覚されるためには, Y^l と Y^h のこう配は, 人間の視覚特性に基づいて決まるしきい値 δ よりも小さくしなければならない．

次節の実験では, 上記の要求を満たす Y^l と Y^h を, 反復法により決定した．具体的には, $Y^l = 0$ の初期値を与えたのち, 拘束条件を満たすように Y^h と Y^l を交互に更新した．詳細な更新ルールについては, 4.1.1 と 4.1.2 で述べる．なお, 我々は, 数回の更新で値が収束することを確認している．このようにして Y^l と Y^h が決まると, 補正画像を投影したときに観測される輝度 Y' は,

$$Y' = \exp \left[Y(Y^h - Y^l) + Y^l \right] \quad (7)$$

のように与えられる (図 5)．

4.1.1 ダイナミックレンジによる拘束

まず, 第 1 の拘束条件について, $H, Y,$ 及び, 下限 Y^l の初期値が与えられたときに, 上限 Y^h を更

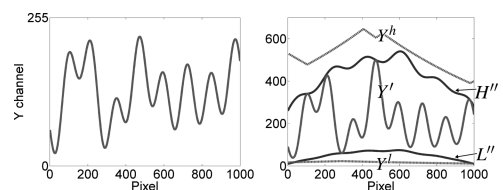


図 5 輝度の変換の概念図 (一次元のみ表示): (左) 原画像の輝度 Y (右) 変換後の輝度 Y' . 原画像の輝度は, 下限 $Y^l = \exp(Y^l)$ と上限 $Y^h = \exp(Y^h)$ の間に内挿される．

Fig. 5 Illustration of the luminance fitting algorithm in a single dimension. The initial luminance values Y (left) are fit into the the low $Y^l = \exp(Y^l)$ and high $Y^h = \exp(Y^h)$ luminance range (right).

(注5): ただし, 完全に黒色の投影面など, プロジェクタの光学補正自体が不可能となるようなケースは対象としない．

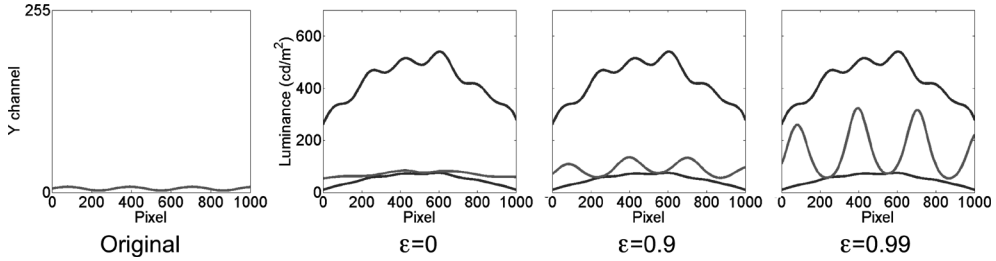


図 6 コントラストの変換に対するパラメータ ϵ の効果

Fig. 6 The parameter ϵ is used to control the stretching applied to the original image.

新することを考える．プロジェクトのダイナミックレンジによる拘束条件を満たすためには，例えば， $H = Y(Y^h - Y^l) + Y^l$ を満たすように Y^h を決定することが考えられる．しかしながら，このような更新は，コントラストの低い原画像を，過度にコントラストの高い画像に変換してしまう可能性がある．そこで，原画像のコントラストを過度に高くしすぎないために，パラメータ ϵ ($0 < \epsilon \leq 1$) を用いて， Y^h を，

$$Y^h \leftarrow \frac{H - Y^l}{\epsilon Y + (1 - \epsilon)} + Y^l \quad (8)$$

のように更新する．同様にして， Y^l の更新ルールを，

$$Y^l \leftarrow \frac{L - \epsilon Y Y^h}{1 - \epsilon Y} \quad (9)$$

のように定める．

図 6 に示したように， ϵ が小さくなればなるほど，原画像のコントラストを反映した低コントラストの結果が得られることが分かる．次節の実験では，経験的に， $\epsilon = 0.9$ とした．

4.1.2 境界の一様性による拘束

次に，第 2 の拘束条件について，Majumder ら [8] と同様にして境界を更新する．具体的には，式 (8) で得られた上限 Y^h の値を，それ以下の値に置き換える．このとき， $Y^h (= \log Y^h)$ のこう配がしきい値よりも小さくなるように，

$$\begin{aligned} & Y_{i,j}^h - Y_{i',j'}^h \\ & \leq \log \left[1 + \delta \sqrt{(i - i')^2 + (j - j')^2} \right] \quad (10) \\ & \forall i' \in \{i - 1, i, i + 1\}, \forall j' \in \{j - 1, j, j + 1\} \end{aligned}$$

の条件のもとで Y^h を更新する．下限 Y^l についても同様に，式 (9) で得られた値を，それ以上の値に置き換える．

人間の視覚特性は 5 cycles per degree の周波数において最も感度が高く，1%程度の輝度の差を知覚できることが知られている．そのため，例えば，幅 2m の平面に投影された 1024×768 画素の画像を投影面から 3m 離れて観測するときには， $\delta = (180 \times 5 \times 0.01 \times 2) / (\pi \times 3 \times 1024) \approx 1/540$ となる．

4.2 補正画像への変換

変換後の輝度 Y' が $L \leq Y' \leq H$ を満たすとき，プロジェクトのダイナミックレンジ内で，原画像の色信号をそのまま再現することができる．一方， $L \leq Y' \leq H$ を満たさない場合には，輝度や色信号を正確に表現するのは困難であるため，以下の表に示すように輝度と色信号を定める．

Case	Luminance	Final XYZ value
1	$H' \leq Y'$	$d^{H'}$
2	$H < Y' < H'$	interpolate between d^H and $d^{H'}$
3	$L \leq Y' \leq H$	interpolate between d^L and d^H
4	$L' < Y' < L$	interpolate between $d^{L'}$ and d^L
5	$Y' \leq L'$	$d^{L'}$

最後に，こうして得られた XYZ 色空間の画像に対して，プロジェクトの応答関数と式 (1) で記述される色空間の変換を考慮して，プロジェクトへの入力となる RGB 色空間で表現された補正画像を求める．

5. 実験結果

図 8 に結果の一例を示す．原画像をそのまま投影した場合に，投影面のテクスチャが見えているのに対して，補正画像を投影した場合には，コントラストを低下させることなくテクスチャの影響を著しく軽減できているのが分かる．また，図 8 の補正画像では投影面の模様の影響を軽減するために原画像をどのように変

更しているのか補正の様子がよく分かる^(注6)。

更に、本論文で提案した投影画像の補正において、人間の視覚特性を考慮したこと、及び、空間的に非一様な写像を用いたことの効果を示した結果画像を図 7 に示す：(a) は投影面、(b) は光学補正を行わない場合の観察画像、(c) はプロジェクタの物理的に可能な出力範囲を考慮して空間的に一様な写像を行った場合の観察画像、(d) はプロジェクタの物理的に可能な出力範囲に基づき空間的に非一様な写像を行った場合の観察画像、(e) は人間の視覚特性に基づきプロジェクタ出力範囲を仮想的に広げて非一様な写像を行った場合の観察画像を示している。

ここで、空間的に一様な写像を用いる従来手法 ([4], [5] など) に対応する結果画像は図 7(c) となる。先に述べたように、従来研究では補正誤差をどの程度認めて観察画像の輝度範囲を設定するのか具体的な方法が示されていない。そのため、この実験では観察画像の輝度範囲を手作業により調整し、画像のコントラストを下げすぎずかつ誤差パターンが気にならない最良の観察画像を実現している。

図 7(c), (d), (e) を比較してみると、(c) の観察画像では、光学補正により投影面のテクスチャの影響が軽減されて投影面の模様は見えなくなっているものの、投影面の一部の反射率が低いことに起因して、観察画像全体の明るさが必要以上に暗く、コントラストが著しく低下している様子が分かる。これに対し、提案手法を適用した (d) と (e) の補正結果では、投影面のテクスチャの影響を軽減しながらも、画像全体の明るさやコントラストが保たれている様子が分かる。また、提案手法の実験結果では、原画像の内容と人間の視覚特性に基づき、自動で輝度範囲を調整し良好な観察画像を実現することができている。

更に、(d) と (e) の観察画像を比較すると、(e) では (d) よりもコントラストの高い、引き締まった印象の観察画像が実現できており、このことは人間の視覚特性に基づき誤差を認めて光学補正を行うことの有効性を示している。

更に図 9 では、補正あり及び補正なしの観察画像とその一部を拡大したものを示す。投影面のテクスチャなどの影響を軽減するための補正の様子及びその詳細を拡大図で確認することができる。なお、図 7, 図 8, 図 9 では、室内の異なる照明条件のもとで実験が行われた^(注7)。どの実験結果においても、環境光の影響を軽減した補正が効果的に行われている様子が分かる。

なお、Pentium 4, 3.2 GHz の CPU を用いたときの典型的な計算時間は、1024 × 768 画素の画像に対して、以下のとおりであった。

Task	Time
Convert original image to XYZ	20 ms
Make L, H, L', H'	550 ms
Threshold map	480 ms
Make L'', H''	10 ms
Iterative luminance fitting (3 rounds)	350 ms
Make final XYZ and convert to RGB	280 ms
TOTAL	1690 ms

最後に、ユーザ評価の結果を報告する。この評価では、本論文の主題であり、かつ、上記のように計算コストも要する、観察者にとって知覚されにくい誤差（色信号及び輝度）のしきい値を導入することの効果を検討した。具体的には、10 名の被験者に対して、(a) 提案手法により得られる補正画像、及び、(b) 色信号と輝度の誤差のしきい値をゼロとしたときに前節の手順で計算される補正画像の 2 種類の画像を、プロジェクタによりランダムな順番で提示した。被験者に、1. どちらの画像が違和感がなく自然に見えて好ましいか、及び、2. どちらの画像のコントラストが高くはつきりと表示できているかという質問をした。

1 の質問は、補正が有効に働かない場合には、原画像と投影面のテクスチャが重なって見えてしまい観察画像が不自然な印象となることが多いという経験に基づき、補正の効果を確認するために行った。2 の質問は、人間の視覚特性に基づき、観察者にとって違和感を生じないずれを積極的に認めて補正を行うことにより、補正誤差を観察者に気づかれることなく観察画像のコントラストを可能な限り拡大できるという提案手法の利点を検証するために行った。なお、提示した画像は 10 組であり、合計 100 の回答を得た。

その結果、被験者の好む画像は (a) 94, (b) 4, どちらともいえない 2, コントラストの高い画像は (a) 96, (b) 4, どちらともいえない 0 であった。また、多くの被験者から、色信号と輝度の誤差を積極的に利用した補正結果の方、より鮮明かつ自然に見えるという感想を得た。

これらの実験結果からも、オフィスや居間の壁など

(注6): ただし、読者が本論文を読む環境と実験環境では、画像の大きさやシーンの明るさなどが異なるために、一般に、知覚される画像は異なることに注意が必要である。

(注7): この実験を通して、天気や時間の違いにより、太陽光などの外界からの環境光の変化が室内の環境光に大きな影響を及ぼしていることが分かった。

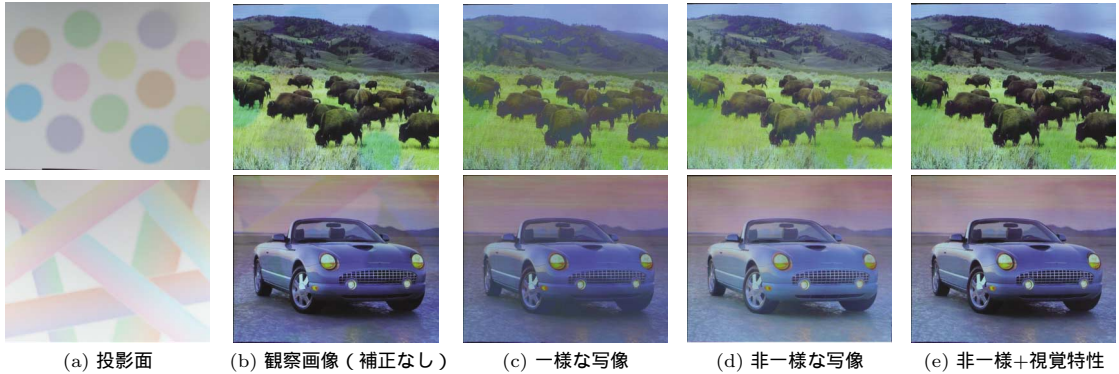


図 7 補正段階による観察画像の違い

Fig. 7 Compensation results with and without perceptual thresholds using uniform or non-uniform fitting.



図 8 光学的補正の結果

Fig. 8 Compensation results.

をスクリーンとして利用するなど、投影面自体に模様があり専用スクリーンのように均一かつ高い反射率をもたない場合のプロジェクタの光学的補正に関して、人間の視覚特性に基づき観察者にとって違和感を生じない補正誤差を積極的に認めて補正を施すことにより、観察画像のコントラストを可能な限り保持したまま投影面の模様の影響を軽減する画像投影が実現できることが分かった。

6. む す び

環境光下で不均一な反射率をもつ面に画像を投影す

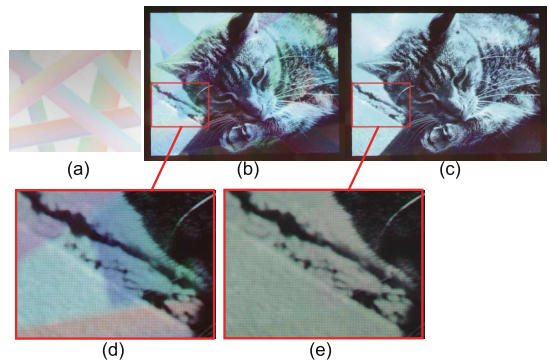


図 9 光学的補正の結果。(a) 投影面、(b) 原画像をそのまま投影した結果、及び、(c) 補正画像を投影した結果。(d)(e) は (b)(c) の枠内をそれぞれ拡大したもの。

Fig. 9 Compensation results. (a) A surface used for displaying projected images, (b) when an image is projected, variations in surface reflectivity, lighting, and projector brightness are apparent in the final output, (c) we alter the input to the projector to compensate for the irregularities. (d)(e) shows an enlarged version of the cat image above.

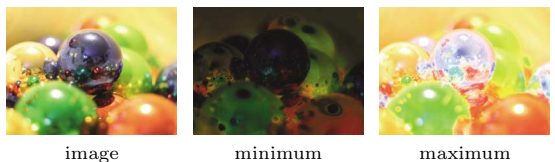


図 10 原画像と同じ色信号を示す画像:(左)原画像(中央)最小輝度(右)最大輝度により構成される。

Fig. 10 Two colours are calculated for each pixel that have the same chrominance as the original image, but minimal and maximum luminance based on the projector capability.

る場合、正しい色で投影可能な画像のコントラストが低下してしまうという問題に対し、本研究では、人間の視覚特性に基づき、観察者がほとんど知覚できない形で色と輝度の誤差を積極的に用いることによって、よりコントラストの高い画像を再現可能とする手法を提案した。

これまで報告されているプロジェクタの光学補正手法とは異なり、提案手法ではプロジェクタや投影面の光学特性のみならず、投影しようとする画像の内容に応じて可能な限り投影面で観察される画像の画質を向上させる工夫が用いられている点が大きな特長となっている。本論文では提案手法の詳細を紹介した上で、様々なパターンをもつ投影面への画像の投影に提案手法を適用した結果を報告した。これらの実験結果から、提案手法を用いることにより環境光下で不均一な反射率をもつ面に投影する場合においても、コントラストの高い良好な画質を得ることができることを確認した。

今後の研究課題として、提案手法を更に拡張するためにいくつかの方向を検討している。特に、本研究では静止画の投影を取り扱ったが、今後は動画を投影する場合の光学的補正に関しても研究を進めていきたい。その場合、静止画の知覚のみならず、動画の知覚に関する人間の視覚特性を考慮することにより、より積極的に画質を向上させるための手法を設計することを考えている。また、本研究における提案手法では投影面と観察者との位置関係が既知であると仮定していたが、この条件を緩和するための改良に関しても取り組んでいきたい。

謝辞 本研究は、国立情報学研究所共同研究費及び科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業（PRESTO）の研究助成により行われた。

文 献

- [1] O. Bimber, A. Emmerling, and T. Klemmer, "Embedded entertainment with smart projectors," *IEEE Comput.*, vol.38, no.1, pp.48–55, 2005.
- [2] P.J. Burt and E.H. Adelson, "The Laplacian pyramid as a compact image code," *IEEE Trans. Commun.*, vol.31, no.4, pp.532–540, 1983.
- [3] デジタル映像共通仕様開発プロジェクト
<http://www.mpeg.rcast.u-tokyo.ac.jp/DECSDP/top.html>
- [4] K. Fujii, M.D. Grossberg, and S.K. Nayar, "A projector-camera system with real-time photometric adaptation for dynamic environments," *Proc. CVPR* 2005, pp.814–821, 2005.
- [5] M.D. Grossberg, H. Peri, S.K. Nayar, and P.N. Belhumeur, "Making one object look like another:

Controlling appearance using a projector-camera system," *Proc. CVPR* 2004, pp.452–459, 2004.

- [6] A. Ilie and G. Welch, "Ensuring color consistency across multiple cameras," *Proc. ICCV* 2005, pp.1268–1275, 2005.
- [7] デジタルシネマラボラトリ
<http://www.kri.sfc.keio.ac.jp/ja/lab/digitalCinema.html>
- [8] A. Majumder and R. Stevens, "Perceptual photometric seamlessness in projection-based tiled displays," *ACM Trans. Graphics*, vol.24, no.1, pp.118–139, 2005.
- [9] C. Pinhanez, "The everywhere displays projector: A device to create ubiquitous graphical interfaces," *Proc. Ubiquitous Computing (UbiComp)* 2001, pp.315–331, 2001.
- [10] M. Ramasubramanian, S.N. Pattaniak, and D.P. Greenberg, "A perceptually based physical error metric for realistic image synthesis," *Proc. ACM SIGGRAPH* 99, pp.73–82, 1999.
- [11] M.C. Stone, "Color and brightness appearance issues in tiles displays," *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol.21, no.5, pp.58–66, 2001.
- [12] D. Wang, I. Sato, T. Okabe, and Y. Sato, "Radiometric compensation in a projector-camera system based on the properties of human vision system," *Proc. IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems* 2005, 2005.
- [13] W.D. Wright, "The sensitivity of the eye to small colour differences," *Proc. Physical Society*, vol.53, no.2, pp.93–112, 1941.
- [14] 中嶋正之, "最新のデジタルシネマの動向," *映情学誌*, vol.59, no.2, pp.199–203, 2005.
(平成 18 年 10 月 12 日受付, 19 年 2 月 13 日再受付)



マーク アッシュダウン

Mark Ashdown received a B.A. and Ph.D. in Computer Science from the University of Cambridge, UK. He spent two years as a postdoctoral fellow at the University of Tokyo, Japan, and is currently a research scientist at the Massachusetts Institute of Technology in the US. His research interests span computer vision, human-computer interaction, and computer-supported co-operative work. His work has included geometric and photometric projector calibration and compensation, personal projected desk displays, and the use of such displays for remote collaboration in conventional meetings and in time-sensitive decision making.



佐藤いまり

1994 慶大・総合政策卒, 2005 東京大学大学院学際情報学府博士課程了. 学際情報学博士. 同年より国立情報学研究所助手を経て, 現在同研究所准教授, 科学技術振興機構 さきがけ研究員. 光源環境の推定, イメージベースドモデリング&レンダリングに

関する研究に従事. 1992 ~ 1993 Carnegie Mellon University (CMU), Center for Machine Translation, Research Assistant, 1994 ~ 1996 CMU, The Robotics Institute, Visiting Scholar.



岡部 孝弘 (正員)

1997 東大・理・物理卒. 1999 同大大学院理学系研究科物理学専攻修士課程了. 2000 同博士課程中退. 2001 より東京大学生産技術研究所技官, 助手を経て, 現在同助教. コンピュータビジョン, コンピュータグラフィックス, 画像パターン認識に関する研究に従事.

平 17 年度本会論文賞, MIRU2004 優秀論文賞, 平 16 年度 PRMU 研究奨励賞などを受賞. 情報処理学会, IEEE 各会員.



佐藤 洋一 (正員)

1990 東大・工・機械卒. 1997 カーネギーメロン大学計算機科学部ロボティクス学科博士課程了. Ph.D in Robotics. 同年より東京大学生産技術研究所研究機関研究員, 講師, 助教授を経て, 現在同大学大学院情報学環准教授. コンピュータビジョン,

ヒューマン・コンピュータ・インタラクション, コンピュータグラフィックスに関する研究に従事. 平 18 本会論文賞, 平 11 情報処理学会山下記念研究賞, 平 11 日本バーチャルリアリティ学会論文賞等を受賞. 情報処理学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ACM, IEEE 各会員.