

人間の視覚特性を考慮した投影画像の光学的補正

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

[†] 東京大学生産技術研究所 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

^{††} 国立情報学研究所 〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2

E-mail: [†]{ashdownm,takahiro,ysato}@iis.u-tokyo.ac.jp, ^{††}imarik@nii.ac.jp

あらまし 実世界内のさまざま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持つ被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うる誤差を計算する。こうして得られた各画素の輝度範囲、および、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。本稿では、提案手法のアルゴリズムを説明し、さまざま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

Perceptual Photometric Compensation for Projected Images

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

[†] Institute of Industrial Science, The University of Tokyo Komaba 4-6-1, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

^{††} National Institute of Informatics Hitotsubashi 2-1-2, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8430 Japan

E-mail: [†]{ashdownm,takahiro,ysato}@iis.u-tokyo.ac.jp, ^{††}imarik@nii.ac.jp

Abstract Digital projectors have been steadily becoming smaller and cheaper, and are now used to augment various surfaces with digital information. However, in situations other than the ideal dark room with a perfect white screen we must contend with ambient light and non-uniformity in surface colour, which will reduce the contrast of the output and introduce visible irregularities. Here we present a method to compensate for the irregularities and simultaneously achieve contrast equal or similar to that which would be obtained in the ideal situation. Rather than insisting on a photometrically perfect result we allow some errors in the final output due to the limited projector range and spatial variations, but these are bounded by perceptual limits derived from a model of the human visual system and the content of the image.

Key words projector, calibration, compensation, human vision, perception

1. はじめに

従来、プロジェクタを利用する際には照明を落とした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持つとは言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], [7]。

しかし、このような場合、投影される面 (投影面) が専用スクリーンのように均一かつ高い反射率を持つことは稀であり、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ズレ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測される投影面上の出力 (観察画像) との関係を予め求めておき、その関係に基づき入力画像を補正してズレ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 [4] と Fujii らによる手法 [3] 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，原画像の内容を考慮すること無しに，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付けるといふ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，その影響を避けることは観察画像の明るさや色の範囲を必要以上に制限することになり，結果として観察画像のコントラストが非常に低くなってしまふという欠点が存在した．例えば，投影面上の一部が低い反射率を持つとすると，この部分では観察画像を明るくすることができない．観察画像の一部だけが暗くなってしまうのを避けるためには，画像全体の明るさを制限しなければならず，高い反射率を持つ部分では明るい画像を実現することが可能であるにもかかわらず，観察画像全体を必要以上に暗くし，コントラストを下げなければならない．

これに対し，本研究では，不均一な反射率を持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 らの手法 [4] や Fujii らによる手法 [3] による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．また，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ズレを積極的に認めることにより，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．

これにより，先に述べた例のように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，画像全体を必要以上に暗くしてしまうこと無しに，良好なコントラストを持った観察画像を投影面に映し出すことができる．

これまでも，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 [6] と Wang ら [10] 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 [10] 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閾値マップ (Perceptually-based Threshold Map, [8]) にもとづき，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もとづいていた．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歪み無く所望の色と明るさで投影するためには，光学的補正だけではなく幾何的補正が必要となる．カメラ・プロジェクタ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ため，本研究では投影面として平面のみを対象として，特別な幾何的補正は考慮しないこととする．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ため，プロジェクタの入出力を示す応答関数を投影面の輝度計測に基づき求めておき，入力 RGB 値に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 [9] 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) との関係を定義している．また，Grossberg ら [4] 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．

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，変換行列 M と環境光 t の 12 要素を求めている．光学キャリブレーション手順の詳細は 5.1 に示す．さらに， 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．

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，以下の手順にも

(注1): クロミナンス：ある色と同輝度の参照色との差異．

とづき光学補正を行っていく．以下，原画像の輝度 Y ，色信号 $\mathbf{e} = (e_x, e_y)^\top$ とする．^(注2)

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 \mathbf{e} を満たす輝度の範囲 $[L, H]$ を求める (図 1 参照)． L は最小， H は最大輝度を示す．
2. 色閾値による輝度範囲の拡張：色信号 \mathbf{e} に対する誤差の許容範囲 (色閾値) に基づき，輝度範囲を仮想的に広げる $[L', H']$ ．
3. 輝度閾値による輝度範囲の拡張：輝度に対する誤差の許容範囲 (輝度閾値) に基づき，上記で求めた輝度範囲をさらに広げる．色閾値，輝度閾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 $[L'', H'']$ におさ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非線形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おさまっていく．
5. 投影画像の生成：写像された輝度 Y' にもとづき色信号を求める，式 (1) の逆変換により光学補正を施した入力画像 (補正画像) を求める．以下，各手順を詳しく説明する．

3. 人間の視覚特性にもとづく輝度範囲の拡張

3.1 物理的な輝度範囲の設定

実空間内のさまざま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 \mathbf{e} を満たす輝度の範囲を求めていく．

式 (1) および XYZ から Y_{xy} への変換により，ある RGB 値 $\tilde{\mathbf{i}}$ 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， $\tilde{\mathbf{i}} = (1, 0, 0)^\top, (0, 1, 0)^\top, (0, 0, 1)^\top$ 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 ($\mathbf{r}, \mathbf{g}, \mathbf{b}$) 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 $\tilde{\mathbf{i}} = (0, 0, 0)^\top, (1, 1, 1)^\top$ に対応する色信号 (\mathbf{l}, \mathbf{h}) も求めておく．

ここで，原画像の色信号 $\mathbf{e} = (e_x, e_y)^\top$ が求めた色領域内に存在する場合は \mathbf{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 \mathbf{e} からの距離が最小の点を \mathbf{e} として，この色

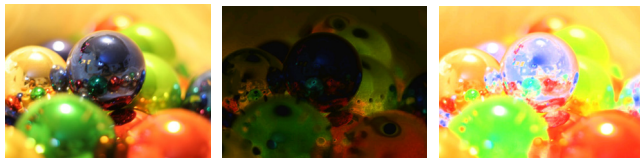


image minimum maximum

図 1 現画像と同じ色信号を示す画像：(左) 最小輝度，(右) 最大輝度により構成される．

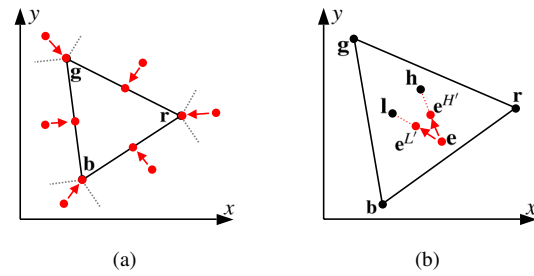


図 2 色信号のクリッピングおよび色信号誤差の閾値．

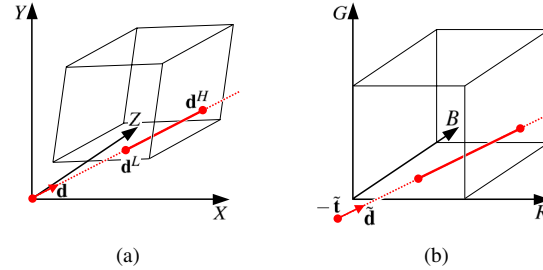


図 3 XYZ および RGB 空間における出力領域：(a) XYZ 色空間におけるベクトル \mathbf{d} 上の点は同じ色信号を持つ．(b) RGB 空間での議論を通して，出力領域と \mathbf{d} との交点の導出する．

信号を満たす輝度の範囲を求めていく (図 2 (a))．

3.2 \mathbf{e} に対応する最大・最小輝度 $[L, H]$ の算出

色信号 \mathbf{e} は，XYZ 色空間ではベクトル $\mathbf{d} = (e_x, e_y, 1 - e_x - e_y)^\top$ に対応する．すなわち，このベクトル上の点 $s\mathbf{d}, s \geq 0$ は，全て同じ色信号 \mathbf{e} を持つことになる．式 (1) より次式を得る：

$$s\mathbf{d} = \tilde{\mathbf{M}}\mathbf{t}. \quad (2)$$

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

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

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 $\tilde{\mathbf{d}}$ のスケール (s^L, s^H) を求めていく．RGB 空間において，全ての $\tilde{\mathbf{i}}$ を含む領域は単位立方体を形成し，色信号 \mathbf{e} に対応し最小輝度を持つ点は $\tilde{i}_R = 0, \tilde{i}_G = 0, \tilde{i}_B = 0$ の面とベクトル $\tilde{\mathbf{d}}$ 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， $s_R = \tilde{i}_R / \tilde{d}_R$ ， $s_G = \tilde{i}_G / \tilde{d}_G$ ， $s_B = \tilde{i}_B / \tilde{d}_B$ のように求まる．これらの点のうち， $-\tilde{\mathbf{t}}$ からの距離が最も遠い点が色信号 \mathbf{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，

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

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

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

従って， $\mathbf{d}^L = s^L \mathbf{d}$ ， $\mathbf{d}^H = s^H \mathbf{d}$ の 2 点を求め，それぞれに対応する輝度 L および H を求めることができる．

(注2)：プロジェクタ投影により投影画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おさ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．

3.3 色信号における誤差の考慮

人間の視覚特性にもとづき、色信号に対する誤差の許容範囲(色閾値)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 から色閾値距離分離れた点 (e^L, e^H) を求める。言い換えれば、 e からの距離が閾値距離にある 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、Wight らにより示された知覚可能な色誤差のデータ [11] に基づき色閾値を決定している。

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 $[L', H']$ の輝度範囲をさらに広げていく。本研究では、Ramasubramanian らにより提案された輝度閾値 (Perceptually-based Threshold map [8]) に基づき、人間が知覚しない輝度差の閾値 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 以上の輝度を持つ場合、誤差の閾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。

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 2 つの値を掛け合わせた閾値 r を求め、さらに相対的な輝度閾値 $T = (Y + r)/Y$ を求めている。ここで、 T は輝度に対して相対的な閾値を示し、 $T = 1.1$ 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3)、 T に基づき拡張された輝度範囲は、

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

のように求まる。

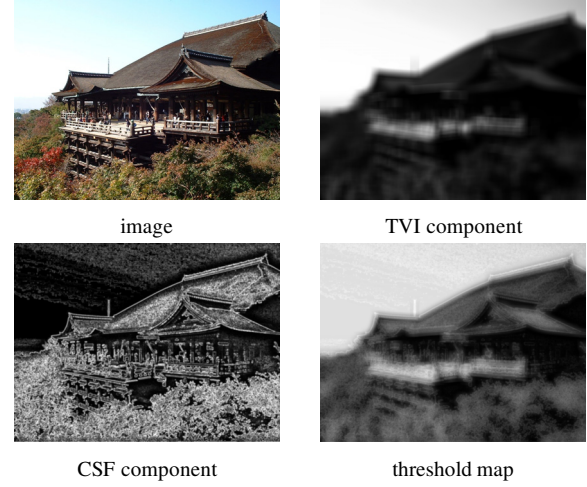


図 4 輝度差の許容範囲の推定：原画像の輝度値 Y を用いて TVI と CSF の要素を求め、それらを掛け合わせることで最終的な閾値 T が求まる。

4. 光学的補正のための原画像の変換

光学的補正の実現のためにプロジェクタへの入力として用いる画像を、原画像に対して、補正画像と呼ぶことにする。本節では、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、前節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、空間的に非一様な非線形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、 $\mathbb{L} = \log L'', \mathbb{H} = \log H'',$ および、 $\mathbb{Y} = \log Y$ として、対数ドメインで議論する。なお、 \mathbb{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、 $Y' = \mathbb{Y}(\mathbb{Y}^h - \mathbb{Y}^l) + \mathbb{Y}^l$ のようにして、画素ごとに定義された下限 \mathbb{Y}^l と上限 \mathbb{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 \mathbb{Y}^l と \mathbb{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 \mathbb{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、 $\mathbb{L} \leq \mathbb{Y}(\mathbb{Y}^h - \mathbb{Y}^l) + \mathbb{Y}^l \leq \mathbb{H}$ を満たさなくてはならない。

- 境界の一樣性による拘束：境界の輝度があたかも一樣であるかのように知覚されるためには、 \mathbb{Y}^l と \mathbb{Y}^h の勾配は、人間の視覚特性に基づいて決まる閾値 δ よりも小さくなければならない。

次節の実験では、上記の要求を満たす \mathbb{Y}^l と \mathbb{Y}^h を、反復法により決定した。具体的には、 $\mathbb{Y}^l = 0$ の初期値を与えたのち、拘束条件を満たすように \mathbb{Y}^h と \mathbb{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 \mathbb{Y}^l と \mathbb{Y}^h が決まると、補正画像を投影したときに観測される

(注3): Weber's law として知られる。

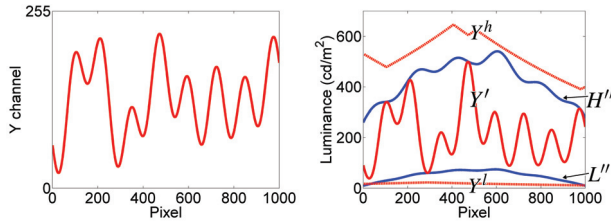


図5 輝度の変換の概念図(1次元のみ表示):(左)原画像の輝度 Y 、(右)変換後の輝度 Y' 。原画像の輝度は、下限 $Y^l = \exp(Y^l)$ と上限 $Y^h = \exp(Y^h)$ の間に挿入される。

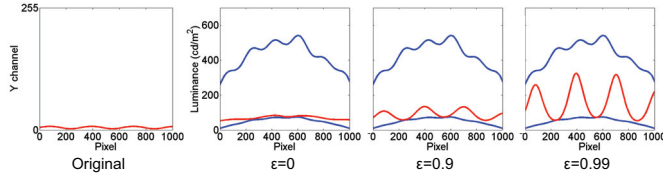


図6 コントラストの変換に対するパラメタ ϵ の効果。

輝度 Y' は、

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

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、第一の拘束条件について、 H 、 Y 、および、下限 Y^l の初期値が与えられたときに、上限 Y^h を更新することを考える。プロジェクタ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、 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わかる。次節の実験では、経験的に、 $\epsilon = 0.9$ とした。

4.1.2 境界の一樣性による拘束

次に、第二の拘束条件について、Majumderら[6]と同様に境界を更新する。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、 $Y^h (= \log Y^h)$ の勾配が閾値よりも小さくなるように、

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

$$\forall i' \in \{i-1, i, i+1\}, \forall j' \in \{j-1, j, j+1\}$$

の条件の下で 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、プロジェクタ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、プロジェクタの応答関数と式(1)で記述される色空間の変換を考慮して、プロジェクタへの入力となるRGB色空間で表現された補正画像を求める。

5. 実験

本節では、プロジェクタのキャリブレーションについて簡単に触れた後で、実験結果を報告する。

5.1 キャリブレーション

プロジェクタのキャリブレーションには、幾何学的側面と光学的側面がある。幾何学的キャリブレーションについては、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た。以後、プロジェクタの画像平面と投影面(およびカメラの画像平面)の対応は既知として議論を進める。

光学的キャリブレーションには、輝度の応答関数の推定と色空間の変換式の推定という二つの問題がある。プロジェクタの輝度の応答関数については、空間的に一樣であることが知られている[6]。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7に示す応答関数を得た。

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。そのため、プロジェクタへ入力した色(RGB)とカメラで計測したときに得られる色(XYZ)の関係から、色空間の変換式を求めた。具体的には、変換式が12個のパラメタを含むこと、およ

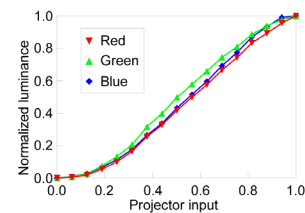


図7 プロジェクタの応答関数。

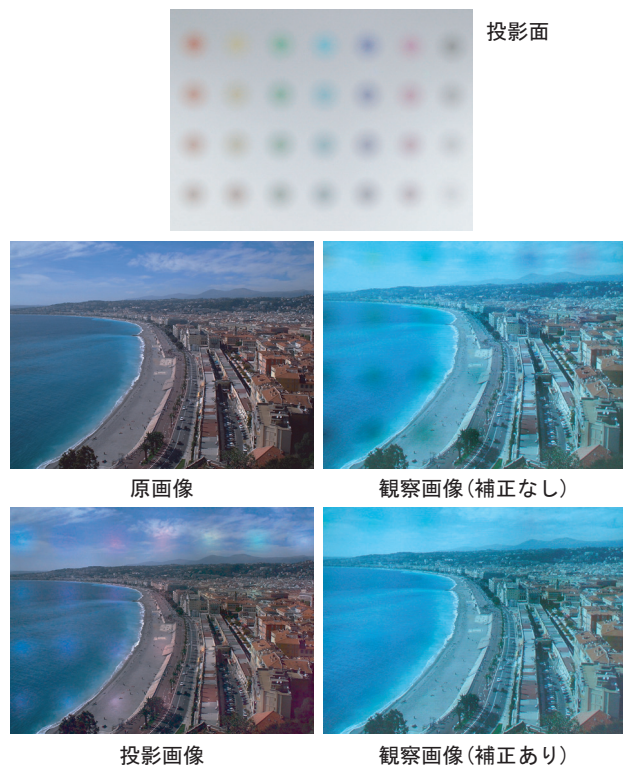


図 8 光学的補正の結果

び、一回の計測で 3 つの拘束が得られることから、4 よりも充分に多い回数だけ計測を行って、最小二乗法によりパラメタを推定した。

なお、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 [5] と同様にして、RGB から XYZ の二次の写像を求めた。

5.2 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わかる。図 9 には、異なる投影面に対する結果を示した。この場合も、投影面のテクスチャなどの影響を軽減できているのを確認することができる。

但し、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。

さらに、本論文で提案する投影画像の補正における人間の視覚特性の考慮と空間的に非一様な非線形写像手法のそれぞれの効果を示した結果画像を図 10 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、^(注4) (d) はプロジェクタの物理的に可能な出力範囲にもと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もと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。

図 10 (c) の観察画像では、光学補正により投影面のテクス

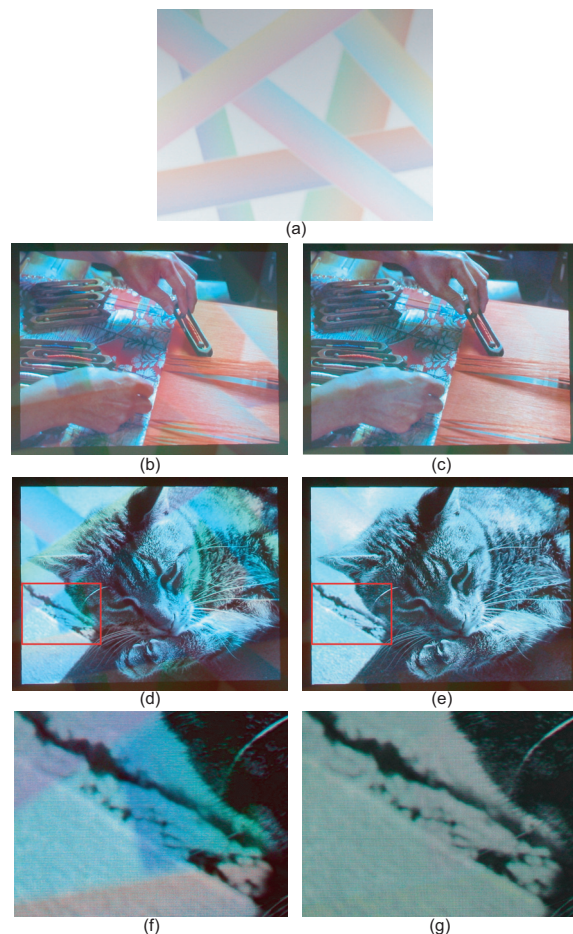


図 9 光学的補正の結果。(a) 投影面、(b)(d) 原画像をそのまま投影した結果、および、(c)(e) 補正画像を投影した結果。(f)(g) は (d)(e) の枠内を拡大したもの。

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。

さらに、(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。

なお、Pentium 4, 3.2 GHz の PC 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、以下の通りであった。

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

(注4): [4] や [3] などの従来手法では空間的に一様な写像が用いられている。



(a) 投影面 (b) 観察画像 (補正なし) (c) 一様な写像 (d) 非一様な写像 (e) 非一様+視覚特性

図 10 補正段階による観察画像の違い。

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、色信号と輝度の閾値を導入することの効果を調べた。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、および、(b) 色信号と輝度の閾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二種類の画像を、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、どちらの画像を好むか、および、どちらの画像のコントラストが高いかという質問をした。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、色信号と輝度の閾値を考慮した画像が、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、プロジェクタの光学的補正に関して、人間の視覚特性を考慮することが重要であることがわかる。

6. 結 び

環境光下で不均一な反射率を持つ面に画像を投影する場合、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、さまざまなパターンを持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持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、提案手法をさら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、静止画に知覚のみならず、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。

文 献

- [1] Oliver Bimber, Andreas Emmerling, and Thomas Klemmer. Embedded Entertainment with Smart Projectors. *IEEE Computer*, 38(1):48–55, 2005.
- [2] Peter J. Burt and Edward H. Adelson. The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code. *IEEE Transactions on Communications*, 31(4):532–540, 1983.
- [3] Kensaku Fujii, Michael D. Grossberg, and Shree K. Nayar. A Projector-Camera System with Real-Time Photometric Adaptation for Dynamic Environments. In *Proceedings of CVPR 2005*, pages 814–821, 2005.
- [4] Michael D. Grossberg, Harish Peri, Shree K. Nayar, and Peter N. Belhumeur. Making One Object Look Like Another: Controlling Appearance Using a Projector-Camera System. In *Proceedings of CVPR 2004*, pages 452–459, 2004.
- [5] Adrian Ilie and Greg Welch. Ensuring Color Consistency across Multiple Cameras. In *Proceedings of ICCV 2005*, pages 1268–1275, 2005.
- [6] Aditi Majumder and Rick Stevens. Perceptual Photometric Seamlessness in Projection-Based Tiled Displays. *ACM Transactions on Graphics*, 24(1):118–139, 2005.
- [7] Claudio Pinhanez. The Everywhere Displays Projector: A Device to Create Ubiquitous Graphical Interfaces. In *Proceedings of Ubiquitous Computing (UbiComp) 2001*, pages 315–331, 2001.
- [8] Mahesh Ramasubramanian, Sumanta N. Pattaniak, and Donald P. Greenberg. A Perceptually Based Physical Error Metric for Realistic Image Synthesis. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 99*, pages 73–82, 1999.
- [9] Maureen C. Stone. Color and Brightness Appearance Issues in Tiles Displays. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 21(5):58–66, 2001.
- [10] Dong Wang, Imari Sato, Takahiro Okabe, and Yoichi Sato. Radiometric Compensation in a Projector-Camera System Based on the Properties of Human Vision System. In *Proceedings of IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems 2005*, 2005.
- [11] W. D. Wright. The Sensitivity of the Eye to Small Colour Differences. *Proceedings of the Physical Society*, 53(2):93–112, 1941.