光透過型ディスプレイの錯覚的色域拡張の一検討

秋山 諒[*1]　山本 豪志朗[*2]　天野 敏之[*3]
プロプスキ アレクサンダー[*4]　藤本 雄一郎[*1]　神原 誠之[*1]　加藤 博一[*1]

A Study of Perceptual Color Gamut Expansion for Optical See-Through Displays

Ryo Akiyama[*1] Goshiro Yamamoto[*2] Toshiyuki Amano[*3]
Alexander Plopski[*4] Yuichiro Fujimoto[*1] Masayuki Kanbara[*1] and Hirokazu Kato[*1]

Abstract – 光学透過型ヘッドマウントディスプレイや透明ディスプレイのような光透過型ディスプレイは，背景となる環境からの光に対して，さらに光を加算することで色彩を表現する．ただし，光の減算は基本的にできないことと，加算できる光量に上限があることから，このようなディスプレイで表現可能な色域は環境に依存する．我々はそのような物理的な色表現の限界を人の知覚特性を利用することで錯覚的に 突破することを目的とする．具体的には，色恒常性という錯視を誘発することで，知覚される色を物理的な色から遷移させることで，物理的には表現不可能な色を知覚的に表現する．本研究では，物理的な色では表現できない範囲の色を表現する手法の確立のために，所望の色を知覚的に表現するためのモデルの提案し，光学透過型ヘッドマウントディスプレイや透明ディスプレイと同等の光学系を透明スクリーンと超短焦点プロジェクタで構築し，実験を行なった．

Keywords ： 光透過型ディスプレイ，色域，拡張現実感，色恒常性

1　はじめに

拡張現実感（AR: Augmented Reality）はデジタル情報を現実世界に即した形で重畳表示を行う技術である．この技術の中には，コンピュータグラフィックスなどのデジタル情報のみでも意味を持っているものを現実世界に存在するかのように表示する目的と，実環境に元々存在する実物体と重ね合わせて見ることで初めて意味をなすデジタル情報を重畳表示することで実物体の見かけを補助する目的とに分けられると考えている．プロジェクタは対象となる実物体に直接光を重畳投影して使用する場合，実物体の幾何情報などは保持しながらそのテクスチャの見かけを変更することができるため，後者の補助的な目的と相性が良く，盛んに研究が行われてきた [13, 14]．それに対し，ヘッドマウントディスプレイ (HMD: Head-Mounted Display) は，三次元のデジタルコンテンツを描画することに目的としたデバイスであるため，HMD を用いて実物体の見かけを補助する研究は存在するが多くはない [3, 4]．しかし，このコンセプト自体は，プロジェクションマッピングに代表されるエンターテイメント用途や衣類に対する投影による光投影によるデザイン支援 [9]，色彩操作による色弱患者のための色覚サポート [8, 4] などの多くの応用例が提案されていることから，有用であるといえる．

プロジェクションによって実物体の見かけを変更する場合，実物体に対して直接光を投影することで色を表現するという性質上，投影対象の物体色と環境光によってプロジェクタの表現可能な色域が狭まるという問題がある．我々はこの問題に対して，錯視を誘発して人の知覚される色に基づいて色制御を行うことによって，プロジェクタの表現可能な色域を知覚的に拡張する手法を提案した [1, 2]．光を加算して色を表現するのは光学透過型 HMD でも同様のため，環境によって表現可能な色域が狭まる問題は光学透過型 HMD でも生じる．しかし，上記のプロジェクション用に提案された手法を転用することができれば，光学透過型 HMD でも知覚的に色域を拡張することが可能となる．すると，知覚的に広い色域による AR 体験をモバイルな光学透過型 HMD で実現できる．さらに，プロジェクタは実物体への投影によってその物体からの反射光を制御することで色を表現する．よって，明るい環境の場合，プロジェクタの投影光が十分明るく，元々存在する環境光の反射光と比べて明るい反射光を投影によって得ることができなければ，投影光は薄い色となる．対して，光学透過型 HMD は観察者の目から近い距離に光源があることから，実物体に重畳投影する場合と比較すると，明るい環境でも所望の色を表現しやすいといえる．

本研究では，光学透過型 HMD によって実物体の見

[*1]奈良先端科学技術大学院大学
[*2]京都大学
[*3]和歌山大学
[*4]オタゴ大学
[*1]Nara Institute of Science and Technology
[*2]Kyoto University
[*3]Wakayama University
[*4]University of Otago

かけを補助するために，錯覚的に表現可能な色域を拡張することを目的とする．本研究では，すでに報告されている色恒常性を利用してプロジェクタの表現可能な色域を知覚的に拡張する手法 [1, 2] を，光透過型ディスプレイに適用することを試みた．光透過型ディスプレイとプロジェクタは光を加算して色を表現するという点で類似しているため，色恒常性の誘発は可能であると考えられる．ただし，プロジェクタと光透過型ディスプレイの光学系は異なるため，上記のプロジェクタのための手法のモデルをそのまま適用することはできない．そこで本研究では，光透過型ディスプレイの知覚的な色域拡張のための色恒常性のモデルを構築し，そのモデルに基づいて実物体の色彩を制御した結果を報告する．

2　関連研究

光学透過型 HMD を使って，実世界を考慮しながら色制御を行う研究は複数存在する．Langlotz ら [4] は，色弱患者が弁別しにくい色を光学透過型 HMD によって変化させることで，視覚を補助する手法を提案した．他にも，実世界の色を打ち消すように光学透過型 HMD で色制御を行うことで，非透過の HMD に映像を表示しているように表現する研究が存在する [7]．これらの研究は実世界の色に基づいて色表現を行うことで所望の色を表現するものであるが，それは基本的にカメラで取得した値を目標値としている．一方で，我々の手法は人の知覚する色を目標値としている．本研究はこれらの既存研究と組み合わせることで，より広い色域での色表現に貢献すると考える．

拡張現実感の研究で，錯視を積極的に利用する研究は光学透過型 HMD を利用するものの他にプロジェクタを利用するものも存在する．Manabe ら [6] は，光学透過型 HMD が光の減算ができないことから影の表現が難しいという問題を，人は相対的な明るさしか知覚できないという視覚特性を利用して，錯覚的に影を表現する手法を確立した．Kawabe ら [10] は，印刷された静止画に対してモノクロのパターン光を投影することによって，静止画に錯覚的な動きを与える手法を確立した．他にも Nagata ら [12] は，グレア錯視を誘発することで，プロジェクタの光学的な限界を超える光沢感を表現する手法を提案している．このように錯視などを用いて人の知覚に基づいた制御を行う研究は増えている．しかし，本研究のように光透過型ディスプレイにおいて表現可能な色域を知覚的に拡張することを目的とした研究は存在しない．光透過型ディスプレイのハードウェアの高品質化により，物理的な表現可能な色域も拡大しているが，明るい場所で有彩色物体の色彩を操作しようとすると，どうしても色域は制限されてしまう．本研究は，それぞれのデバイスで表現可能な色域をさらに拡張する手法として使用されることが期待される．

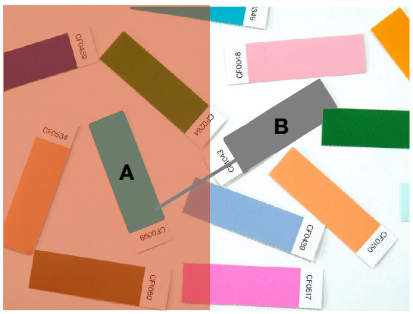

図 1　色恒常性の例．図内の色 A と色 B は異なった色として知覚されるが，物理的な色としては同一である．

3　光透過型ディスプレイにおける色恒常性のモデル化

本研究では，色恒常性という錯視を誘発する．色恒常性とは，一様な有彩色照明が環境に照射されている場合，人が知覚する実物体の色はその照明の色に依らずほぼ一定に保たれるという視覚特性である．図 1 は色恒常性の例を示したものである．図 1 の色 A は水色のように知覚され，色 B は灰色として知覚されるが，どちらも画素値は同一である．この現象は，色 A を見る際にオレンジ色のフィルタがあり，その向こう側に色 A があるものだと視覚システムが見なし，オレンジ色の成分を減衰させたことによって起きている．つまり，物理的には色 B のような灰色のような色でも，周辺の色を変化させることで色 A のような色に知覚させることができるということである．

一様な照明下では，その照明色が異なっても色恒常性によって，対象物の色はほぼ同一であるように知覚される．よって本研究では，光透過型ディスプレイ上に一様な一色の色が表示されているように錯覚させ，そのディスプレイ越しに実物体を観察した際に，その実物体が所望の色彩に知覚されるように色制御を行う．

まず，図 2 に示すような状況を想定する．色 $\boldsymbol{s_c} = (s_{cr}, s_{cg}, s_{cb})^T$ を持つ対象（りんご）が色 $\boldsymbol{s_s} = (s_{sr}, s_{sg}, s_{sb})^T$ の物体（木）に囲まれている．その際に，光透過型ディスプレイ上で，観察者から見て色 $\boldsymbol{s_c}$ の物体と幾何的に完璧に重畳されるように $\boldsymbol{p_c} = (p_{cr}, p_{cg}, p_{cb})^T$ を重畳提示し，その周辺には $\boldsymbol{p_s} = (p_{sr}, p_{sg}, p_{sb})^T$) を重畳提示する．この際に観察者の目に届く光の物理量としては，りんごの部分は $\boldsymbol{c_c} = \boldsymbol{s_c} + \boldsymbol{p_c}$ となり，その周辺は $\boldsymbol{c_s} = \boldsymbol{s_s} + \boldsymbol{p_s}$ となる．

この際に，観察者が光透過ディスプレイには色 $\boldsymbol{p_s}$

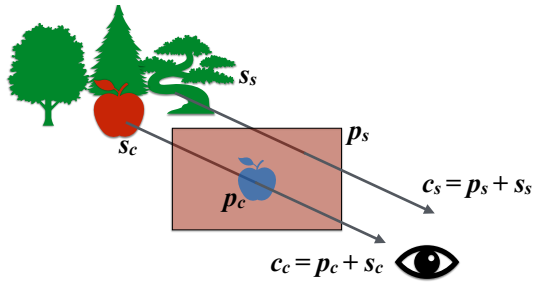

図 2　光透過型ディスプレイで色制御に用いるパラメータ図．全て 3 次元のベクトルであり，RGB 色空間で定義されている．

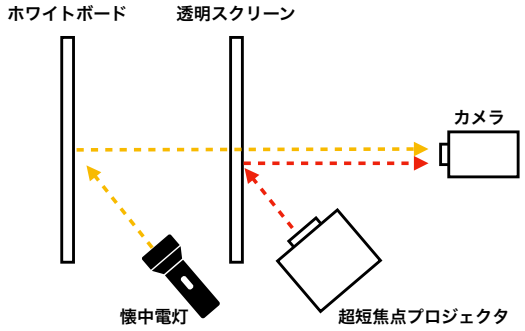

図 3　実験システムの模式図（側面から見た場合）．

の一様な表示がされていると知覚した場合，色恒常性の働きにより $\boldsymbol{p_s}$ をキャンセルした色を物体色として知覚する．色恒常性は本来完璧ではないため，このようなシチュエーションでは色 $\boldsymbol{p_s}$ を完全に除去した色を知覚するわけではないが，本研究では色恒常性を誘発して色域を知覚的に拡張することが有効であるかどうかを確かめるのが第一の目的である．よって，本研究では色恒常性の働きによって一様な照明光の成分は完全に除去されて知覚されるものとしてモデルを作成する．

図 2 の状況で，りんごの物理的な色としては，$\boldsymbol{c_c}$ である．ただし，観察者が青い光が重畳されているのではなく，一様な色 $\boldsymbol{p_s}$ がディスプレイ全体に表示されていると知覚している場合，知覚される色としては色 $\boldsymbol{c_c}$ から $\boldsymbol{p_s}$ の色を減衰させた色になる．知覚される色 $\boldsymbol{c'_c}$ は以下の式により求められる．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{c'_{c-lms}} &= \boldsymbol{c_{c-lms}} ./ \boldsymbol{p_{s-lms}} \\ &= (\boldsymbol{s_{c-lms}} + \boldsymbol{p_{c-lms}}) ./ \boldsymbol{p_{s-lms}} \end{aligned} \quad (1)$$

ただし，./ は要素ごとの除算を意味する．また，式 (1) のベクトルは全て LMS 色空間に変換済みのものとする．この式は Von Kries によって提案された Chromatic Adaptation を基にしたものである [11]．色恒常性が働く一様な有彩色照明下では，L, M, S の 3 つの錐体の感度バランスによって，知覚される色を推定しようという理論である．式 (1) では，対象領域の周辺への表示色の錐体応答の逆数を掛けることで，その周辺の色の成分がキャンセルされるようにモデリングしている．

この色提示において重要となるのが，一様な色が光透過型ディスプレイに表示されていると観察者に錯覚させることである．その錯覚が引き起こせなければ，式 (1) のように知覚的に遷移させた色を知覚させることはできない．その条件として，$\boldsymbol{s_c}$,$\boldsymbol{s_s}$,$\boldsymbol{p_c}$,$\boldsymbol{p_s}$ の全ての要素が 0 以上であり，$\boldsymbol{c'_c}$ も 0 以上であることが求められる．$\boldsymbol{c'_c}$ が負の場合は，$\boldsymbol{p_s}$ が $\boldsymbol{s_c} + \boldsymbol{p_c}$ に比べて大きな値を持っていることになる．つまり，周辺のみが明るく，色を変化させたい対象の部分のみ暗いという状態になる．

4　制御結果

前節で説明した手法に基づいて，実際に物体の色を知覚的に制御した結果を示す．今回の実験には，超短焦点プロジェクタ (EPSON 社製 EB-685W)，カメラ (XIMEA 社製 MC023CG-SY)，透明スクリーン (DNP 社製 透明スクリーン試作品 40 インチ．地面に対して垂直に設置したスクリーンに対して超短焦点プロジェクタからの斜め下方向からの投影光を水平方向へ強く反射させる光学系を持つ透明なスクリーン．) から成るシステムを使用し，透明スクリーンの背面にホワイトボードを配置し，その上に対象を貼り付ける．また，光学透過型 HMD のように，光学系の向こう側が明るい環境を再現するために，懐中電灯を使ってホワイトボード上の対象を照らし，室内の明るさは暗く保った．このセットアップで，実物体の色彩を制御した結果が図 5 である．対象としては X-rite Color Checker を使用し，図 5 のカラーチェッカーの色の中で，1 3 の番号をつけられた部分の色を，それぞれ出来るだけ鮮やかな緑，赤，青に制御した場合の結果である．(a) に示す画像は色彩制御を行う領域のみに投影スクリーンに色を表示したもので，(b) は提案手法により対象領域と周辺領域に異なる色を表示した場合の結果である．それぞれの画像から黒い線で結ばれた色は，対象領域と同一の画素値の色である．また，それぞれの画像の下に配置された色は，筆者がそれぞれの画像内の対象領域を見た際に主観的に知覚した色である．

5　まとめ

本研究では，色恒常性を光透過型ディスプレイを用いて誘発することによって，その環境下で表現できる色域を拡張する手法を提案した．実験では，一定の照明環境下で物理的に表現不可能な色を目標として設定し，その色を知覚的に表現することを試みた．その結果，色恒常性が誘発され，表現可能な色域外の色を知覚させられる可能性が示唆された．

図 4　実験に使用したシステムの外観.

今後，本手法の有効性を確認するために被験者実験を実施する予定である．また，今回のように大きめのディスプレイではなく，頭部に装着する光学透過型 HMD での実装も行い，同様の効果が得られるか検証を行う予定である．

謝辞

本研究は JSPS 特別研究員奨励費 19J14440，JSPS 科研費 16H04384 の助成を受けたものです．

参考文献

[1] Ryo Akiyama, Goshiro Yamamoto, Toshiyuki Amano, Takafumi Taketomi, Alexander Plopski, Christian Sandor, and Hirokazu Kato. “Light Projection-Induced Illusion for Controlling Object Color. ” In Proceedings of IEEE International Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, Reutlingen, Germany, 2 pages, March, 2018

[2] Ryo Akiyama, Goshiro Yamamoto, Toshiyuki Amano, Takafumi Taketomi, Alexander Plopski, Christian Sandor, and Hirokazu Kato. “Perceptual Appearance Control by Projection-Induced Illusion. ” In Proceedings of IEEE International Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, Osaka, Japan, 2 pages, March, 2019

[3] Yuichi Hiroi, Yuta Itoh, Takumi Hamasaki, and Maki Sugimoto. AdaptiVisor: “Assisting eye adaptation via occlusive optical see-through head-mounted displays.” In Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference, 9 pages, March, 2017.

[4] Tobias Langlotz, Jonathan Sutton, Stefanie Zollmann, Yuta Itoh, and Holger Regenbrecht. ChromaGlasses: Computational glasses for compensating colour blindness. In Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (p. 390), April, 2018.

[5] Edwin H Land and John J McCann. “Lightness and Retinex Theory” Josa, 61(1):1-11, 1971.

[6] Shinnosuke Manabe, Sei Ikeda, Asako. Kimura, and Fumihisa Shibata. “Casting virtual shadows based on brightness induction for optical see-through displays”, In Proceedings of the IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, pp. 627-628, March, 2018.

[7] Tobias Langlotz, Matthew Cook, Holger Regenbrecht.“Real-Time Radiometric Compensation for Optical See-Through Head-Mounted Displays”, IEEE transactions on visualization and computer graphics, 22(11):2385-2394, 2016.

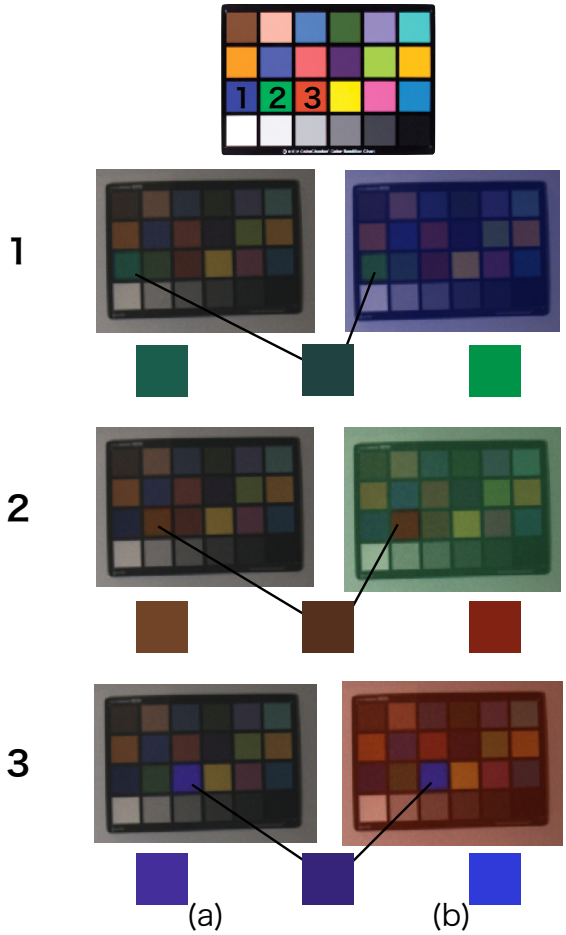

図 5　制御結果．(a) 色を制御する部分のみに色を重畳した場合，(b) 提案手法により周辺にも色を表示した場合．それぞれの投影結果の画像に下にある 3 色の色は，真ん中にあるものはそれぞれの対象領域の画素値と同じ色であり，左右の色は筆者がそれぞれの投影結果を見て知覚した色を示す．

[8] Toshiyuki Amano and Hirokazu Kato, ”Appearance control by projector camera feedback for visually impaired,” IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Workshops, San Francisco, CA, pp. 57-63, 2010.

[9] Yuichiro Fujimoto, Ross T. Smith, Takafumi Taketomi, Goshiro Yamamoto, Jun Miyazaki, Hirokazu Kato, and Bruce H Thomas. “Geometrically-correct projection-based texture mapping onto a deformable object,” IEEE transactions on visualization and computer graphics, 20(4):540–549, 2014.

[10] Takahiro Kawabe, Taiki Fukiage, Masataka Sawayama, and Shin’ya Nishida. “Deformation Lamps: A Projection Technique to Make Static Objects Perceptually Dynamic.” ACM Transactions on Applied Perception, 13(2):10:1–10:17, 2016.

[11] Johannes Von Kries, “Chromatic adaptation.” Sources of color vision, 145-148. 1970.

[12] Shinji Nagata, Toshiyuki Amano. “Gloss Enhancement beyond Projector Performance using the Glare Illusion” IDW’19 - The 26th International Display Workshop 3D4/VHF4/3DSA4-4, 2019.

[13] Toshiyuki Amano and Hirokazu Kato. Appearance control using projection with model predictive control. In Proceedings of 20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), pages 2832–2835, 2010.

[14] Ryo Akiyama, Goshiro Yamamoto, Toshiyuki Amano, Takafumi Taketomi, Alexander Plopski, Christian Sandor, and Hirokazu Kato. “Robust Reectance Estimation for Projection-Based Appearance Control in a Dynamic Light Environment” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, DOI: 10.1109/TVCG.2019.2940453, 2019.

(c) 2020 by the Virtual Reality Society of Japan (VRSJ)