

グレア錯視を用いたプロジェクタの 投影性能を超える光沢感強調

長田 慎司*¹ 天野 敏之*¹

Shinji Nagata*¹ and Toshiyuki Amano*¹

Abstract — 金属光沢などの質感の再現には、高輝度かつ高コントラストの映像提示が必要であるが、一般的なプロジェクタでは照度が不足する。また、環境照明成分による黒レベルの上昇により、プロジェクションで金属光沢などの質感を表現することは困難である。一方で、人にはグラデーションで囲まれた白色領域を実際の輝度よりも知覚的に明るく感じる明るく感じるグレア錯視という現象があることが知られている。本論文では、まず、プロジェクションによってもグレア錯視が誘発されることを示す。次に、このグレア錯視を応用した映像の重畳投影による光沢感の強調手法を提案する。実験の結果、明照明環境においてもプロジェクションでグレア錯視が誘発されることが確認された。また、提案手法と従来手法による輝度強調、白色照明との一対比較より、提案手法による光沢感の強調の有効性が確認された。

Keywords: プロジェクタ、グレア錯視、コントラスト、光沢

1 はじめに

近年、プロジェクションマッピングの流行により、光投影による拡張現実感である空間型拡張現実感 (Spatial Augmented Reality; SAR) の技術が注目されている。SAR は、映像を直接物体へ投影することで実世界での情報提示や現実物体の見た目の色彩や質感の操作を実現する技術であり、Raskar らの Shader Lamps [1] 以来、幾何学校正や光学補償の研究がなされている。

光学補償に関しては、模様のあるカーテンなどへ正しい色彩で映像を投影する手法[2]などが提案されている。しかし、照明環境や反射特性、ハードウェアの能力の限界により、プロジェクションで操作できる色彩やコントラストの範囲には限界がある。このような問題を解決するために、人間の知覚メカニズムに基づく様々な光学補償技術が提案されている。例えば、Ashdown ら[3]は、視覚特性に基づく CIE $L^*u^*v^*$ 色空間を用い、投影スクリーンの反射率の起伏に合わせて投影目標の明度成分を緩やかに変動させることで、知覚的な違和感が生じない最適な投影補償技術を提案している。

一般的に SAR による見かけの操作は、プロジェクタで光を投影することによって、操作対象の見かけを所望の色彩や明度分布に変化させる。このような見かけの操作は暗照明環境に限定されるものではなく、環境照明が照射されている状況を想定することが多い。このような場合、操作対象表面の放射輝度は環境照明のみが照射されている明るさよりも暗くすることができない。また、

拡散反射物体の反射率と光沢を持つ物体の鏡面反射の反射率は大きく異なる。Amano ら[4]は SAR においてコントラストを強調することで、操作対象の光沢感を強調する質感操作を提案しているが、完全に拡散物体を光沢物体の明度分布に変化させる見かけの操作は光学的に困難である。

例えば、光沢のある物体の正反射成分の反射率を拡散反射成分の 10 倍とすると、拡散反射物体の見かけを光沢物体の見かけに変化させるためには、スペキュラを提示する部分では、少なくとも環境照明の 10 倍の照度の投影が必要となる。仮に 1,000lx の環境照明を仮定すれば、10,000 lm のプロジェクタの投影を 1m² 範囲に集中させる必要があり、装置構成が高価かつ大型になる。また、光沢のある物体の拡散反射は一般的に光沢のない拡散反射物体より弱い。投影による見かけの操作は物体表面の明るさを暗くすることができないため、完全な操作は光学的に不可能である。本研究では、このような問題を解決する方法として、光学的に正しい輝度を再現するのではなく、知覚においてより効果的な光沢を提示する質感操作について検討する。

知覚を応用した投影技術として、Kawabe らは物体に時間的に変化する色彩のない輪郭形状の差分を重畳投影することで動き知覚を誘発させ、物体が時間的に変形する錯覚を与える変幻灯[5]を提案している。また、Akiyama ら[6]は、色恒常性を利用することで、プロジェクタで操作可能な色域を超える見かけの色彩操作手法を提案している。色恒常性は有彩色の環境光による物体の色彩の変化を知覚的に補正する機能であり、この研究では背景部分に有彩色の投影を行うことで色恒常

*1 和歌山大学

*1 Wakayama University

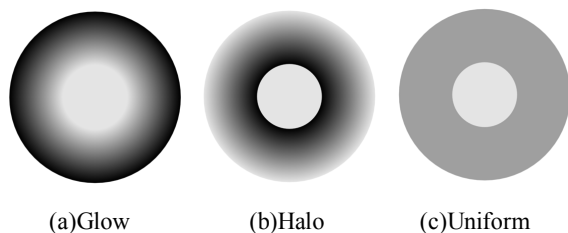


図1 輝度パターン

性を誘発させ、光学的に操作可能な色域を超える色彩の変化を知覚させる色彩操作を実現している。

これらの投影技術は、錯視を応用することで照明環境やハードウェアの能力による制約を超える見た目の操作を実現している。そこで、我々はこのような錯視を利用した効果的な見かけの操作に着目し、より臨場感の高い光沢感の強調を試みる。具体的には、Tamura ら [7]により示されているグレア錯視と呼ばれるグラデーションで囲まれた白色領域の明るさ感や輝き感を誘発する現象を応用する。

本論文では、まず通常の液晶ディスプレイの実験で確認されているグレア錯視がプロジェクションでも誘発されることを示す。その後、グレア錯視を応用した輝度強調と従来のコントラスト強調の比較より、グレア錯視を応用した提案手法の方がより明るく知覚される光沢感の強調が実現できることを示す。最後に一般的なシーンへの応用方法について考察する。

2 関連研究

2.1 グレア錯視

グレア錯視とは、光のにじみを模した周辺刺激によって、中央部分の輝きが明るくされる錯視現象である。

Tamura らは、図1に示すような中央部に Patch(内側の円で視角で 3.4°)を配置し、その周辺部分を Inducer(視角で 3.4° から 9.0° の範囲)で囲んだ形状で、Inducer の輝度が内側から外側にかけて下がる Glow と内側から外側にかけて上がる Halo、そして白色領域が一樣な灰色で囲まれた Uniform の3種類の輝度パターンを用いて知覚的な明るさを比較した。

Tamura らの研究では、環境照明のない実験環境において、Patch の輝度を $0 \sim 200 \text{ cd/m}^2$ の間で18段階に変化させ、ディスプレイで提示し、基準となる Uniform と3種類の輝度パターンについて一対比較を行い、Patch の輝度が Glow, Halo, Uniform の順で明るく知覚されることを明らかにした。また、二項検定の結果から $20 \sim 200 \text{ cd/m}^2$ の間で Glow の知覚的な輝度上昇が有意であり、少なくとも30%の輝度が上昇することが確認されている。一方、Halo は Uniform よりも明るく知覚され、有意な輝度上昇が確認されているが、輝度上昇は20%未満であった。この結果から、グレア錯視は Glow の条件で最も効果的に誘発されることを明らかにした。

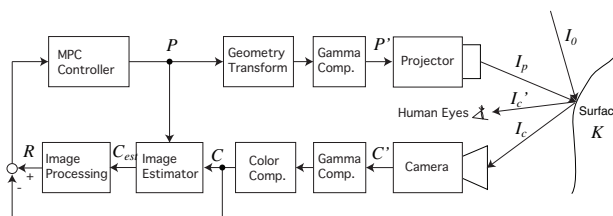


図2 プロジェクタカメラ系



(a)白色投影 (b)コントラスト強調

図3 見かけの操作

2.2 見かけの操作によるコントラスト強調

見かけの操作[8]とは、プロジェクタとカメラを用いたフィードバックによって、物体の色彩や明度を動的に制御する技術である(図2)。この見かけの操作では、色彩操作の他に、コントラスト強調も提案されている。また、Amano ら[4]は心理物理学の知見を応用したコントラスト強調による、光沢感の強調技術を提案している。例えば、このようなコントラスト強調を図3の操作対象(peppers, Standard test image dataset)へ適用すると、(b)に示すように、スペキュラ部分とその周辺の輝度差が変化するため、光沢感を強調することができる。ただし、この光沢感強調は特別なトーンカーブを用いた明度変換であり、グレア錯視のような周辺視の効果は応用していない。

本論文では、これらのようなコントラスト強調とグレア錯視を応用した輝度強調を比較し、グレア錯視を応用した輝度強調の効果を評価する。

3 投影映像によるグレア錯視の誘発

Tamura らの実験では、液晶ディスプレイを用いて環境照明のない実験環境においてグレア錯視による知覚的な輝度上昇を確認した。我々は、このグレア錯視を見かけの操作に応用することで、より効果的な光沢感の強調を試みる。ただし、見かけの操作は環境照明が照射されている明照明環境下で適用される。また、プロジェクタによる映像投影は黒画像を提示している場合にもリーク光があり、液晶ディスプレイ等と比べるとコントラスト比は低い。このような違いはグレア錯視の誘発に影響を与えることが懸念されるため、本研究ではグレア錯視を応用した輝度強調の有効性を調査する前に、予備実験として、プロジェクタによる映像提示においてグレア錯視が誘発されるか確認を行う。

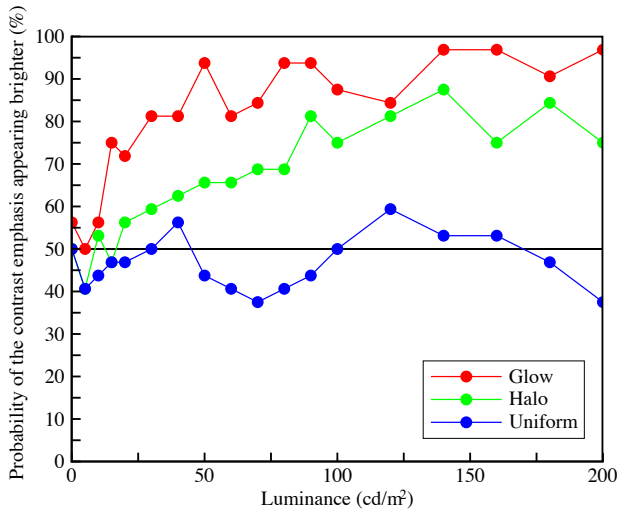


図4 実験結果

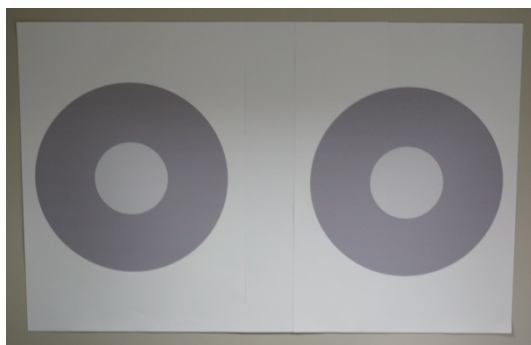


図5 操作対象(印刷された Uniform)

3.1 実験方法

液晶ディスプレイによる映像提示をプロジェクタによるスクリーンへの投影に変更し、Tamuraらの評価実験と同様の手法でのグレア錯視の評価実験を行う。ただし、プロジェクタの投影によるピクセルウィンドウの影響(解像度不足により、投影映像の画素が目視できることによる影響)を回避するために、 4096×2016 画素の高解像度プロジェクタ (SONY, VPL-VW245) を用い、投影範囲を 27inch (596×335 mm) のサイズに調整する。また、環境照明はプロジェクタの光のみとする。

実験参加者はプロジェクタから投影された基準となる Uniform と Glow, Halo, Uniform の 3 種類の輝度パターンから1つ投影し、より明るく感じる Patch の方を回答し、一対比較する。実験には 22~23 歳の男性 4 名の健康者(健康者とは、普通自動車免許取得の際の基準となる眼鏡やコンタクトレンズ装着可能で両眼の視力 0.7 以上で、眼の障害を持たない者とする。)が参加した。

3.2 実験結果及び考察

図 4 にプロジェクタを用いて行なった実験結果を示す。このグラフでは、Patch の輝度を横軸、縦軸を実験参加者が基準となる Uniform よりも明るいと回答した確率を縦軸に Glow を赤色、Halo を緑色、Uniform を青色の

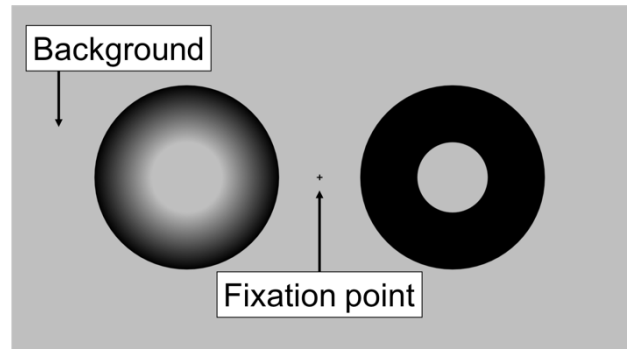


図6 投影画像の例

マーカでプロットしている。図 4 の実験結果から Tamura らがディスプレイで行った実験と同様に、Glow, Halo, Uniform の順で明るく知覚されていることが確認された。したがって、プロジェクタを用いた映像提示でグレア錯視が誘発できることが確認された。また、検定の結果、 15 cd/m^2 以上の放射輝度の Glow でグレア錯視が誘発されることが確認された。

4 グレア錯視を応用した輝度強調

プロジェクタでグレア錯視が有効であることが確認されたので、グレア錯視を応用した輝度強調の有効性について、白色投影、コントラスト強調、そしてグレア錯視を応用した輝度強調の 3 種類の投影で一対比較する被験者実験を行う。操作対象は簡単なサンプルとして、印刷された Uniform を左右に置いたもの(図 5)である。また、環境照明は見かけの操作への応用を考慮して、環境条件である室内の明るさ程度とする。

4.1 投影画像

SAR による輝度強調の実験では、図 5 に示す印刷された Uniform パターンを操作対象として、グレア錯視を応用した輝度強調、コントラスト強調、白色投影の 3 種類で Inducer 部分の明度分布を投影によって変化させた操作について、一対比較を用いて Patch 部分の知覚的な明度を調査する。

具体的には、グレア錯視を応用した輝度強調は、Tamura ら実験で最も効果的にグレア錯視が誘発された Glow(図 1(a))と同じ明となる投影を行う。また、コントラスト強調はトーンカーブによって明暗差を強調する見かけの操作[8]と同様の操作を行う。白色投影は基準として用い、これらについて比較を行う。ただし、この実験は Inducer の輝度分布の違いによって Patch 部分の知覚的な明度の違い評価するため、Background は均一な明度とし、左右の Patch は同輝度となるように投影する。

比較方法はグレア錯視、コントラスト強調、白色投影から 2 種類を選び、左と右の印刷された Uniform に重畳投影する。ただし、左右の入れ替えも考慮し、6 通りに

ついて比較を行う。刺激の放射輝度は、環境照明による Patch の放射輝度 24 cd/m^2 を最小輝度として、24, 29, 34, 39, 44, 54, 64, 74, 84, 94, 104, 114, 124, 134, 144, 164, 184, 204 cd/m^2 の 18 段階に変化させる。したがって、比較刺激としては合計 108 種類を用意する。

4.2 実験の流れ

回答を開始する前に、実験参加者は環境照明が照射されている明照明環境下で 3 分間 Fixation point を注視して目を慣らす。これは眼の虹彩を開き、その環境に目が順応させるためである。3 分経過後、キーボード入力による実験参加者の合図によって、108 枚の刺激の中から無作為に選ばれた 1 枚を 0.3 秒間のみ重畳投影する。実験参加者は投影された瞬間の左右の Patch を見て、どちらの Patch のほうがより明るく感じたのかをキーボードの右矢印と左矢印で回答する。この評価実験において投影時間を 0.3 秒間としている理由は先行研究に習い、実験参加者に考える時間を与えず、直感的に判断させるためである。このような方法による回答を 108 枚の刺激画像について行う。その後、試行回数を増やすために、もう一度繰り返し回答させる手順を 1 セッションとして、合計 4 セッションの回答を行う。

4.3 実験環境

実験参加者は 22 歳から 23 歳の男性 7 名と女性 1 名の合計 8 名の健眼者とした。操作対象への投影は解像度 4096×2016 画素のプロジェクタ (SONY, VPL-VW245) を用い、投影範囲を 27inch ($596 \times 335\text{mm}$) のサイズに調整した。また、投影面と実験参加者との距離を 1340mm とし、実験参加者は着座姿勢で両眼にて操作対象を観測した。

4.4 実験結果

図 7 に白色投影とコントラスト強調を一对比較した結果を示す。グラフでは、Patch の輝度を横軸とし、実験参加者がコントラスト強調のほうが明るいと感じた確率を縦軸にプロットしている。また、各輝度に対して、二項検定を行い、検定統計量 p として有意水準 $p < 0.05$ となる輝度を求め、有意が確認された試行を塗りつぶしマーカーで示している。この結果より、 39 cd/m^2 以上の明るさでは有意水準 5% でコントラスト強調のほうが明るく知覚されることが分かる。

また同様に、グレア錯視を応用した輝度強調とコントラスト強調を一对比較した結果を、図 8 にグレア錯視と白色投影を比較した結果を図 9 に示す。これらのグラフの縦軸は、いずれもグレア錯視の方が明るいと確率を表している。これらの結果について二項検定を行った結果、いずれの実験でも 34 cd/m^2 以上で有意水準 5% において有意となることが確認され、グレア錯視を用いた輝度強調が最も明るく知覚されることが確認された。

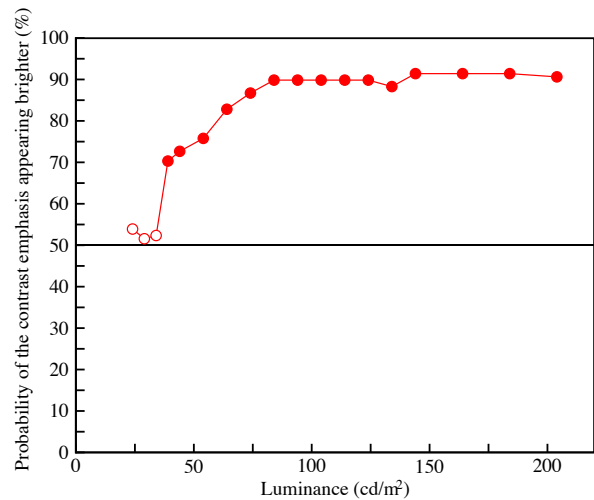


図7 白色投影とコントラスト強調

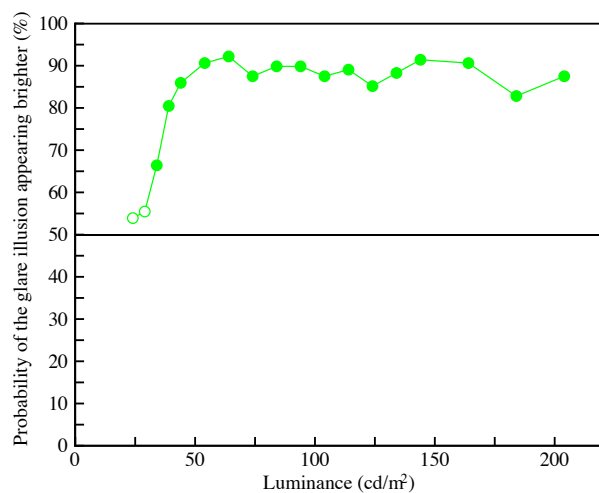


図8 グレア錯視とコントラスト強調

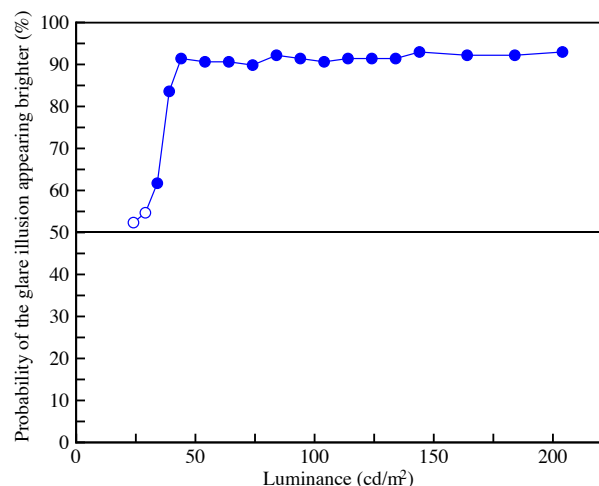


図9 グレア錯視と白色投影

5 考察

5.1 グレア錯視の誘発に必要な最小輝度について

4.4 に示した実験結果では、どの輝度でもグレア錯視

の方が明るく知覚されるという回答が100%とならないものの、チャンスレート(50%)を大きく上回り、グレア錯視、コントラスト強調、白色投影の順で、明るく知覚されることが確認された。この結果は、光学的な明るさを超える明るさが近くされたことを意味しており、プロジェクタの投影性能を超える効果的な光沢感の強調が実現できる可能性が示唆している。ただし、また、3.2 に示した実験では 15 cd/m^2 以上でグレア錯視が誘発されているにも関わらず、4.4 の実験で 34 cd/m^2 未満の提示ではグレア錯視を用いた輝度強調の有意差が確認されなかった。

この理由としては、環境照明によって黒レベルが変化したことが考えられる。したがって、グレア錯視を用いた輝度強調を行うためには、操作対象の放射輝度がグレア錯視を知覚できる最小輝度 15 cd/m^2 以上というだけでなく、環境照明による黒レベルの上昇も考慮した投影が必要となる。具体的には、今回の実験ではプロジェクタによる投影で環境照明によるマーカの放射輝度よりも 20 cd/m^2 明るくなる場合にはグレア錯視を用いた輝度強調が有効に働くことが確認された。

5.2 見かけの制御との関係について

本実験ではプロジェクタカメラフィードバックによる適応的な処理としては実装していない。また、操作対象を Tamura らがグレア錯視の実験で用いた同心円状のパターンに限定している。このような制限はあるが、本論文で試みたグレア錯視を用いた輝度強調は Amano ら[8] が提案している見かけの制御による適応的な処理としても実装できる。また、4.4 に示した実験で比較したコントラスト強調は Amano らが実装しているコントラスト強調に相当する。これらのことから、本論文に示したグレア錯視を応用した輝度強調を用いることで、見かけの操作による光沢感の強調が実現できることが期待できる。

5.3 一般的なシーンへの応用方法について

簡単なサンプルではなく、一般的なシーンのグレー画像(図 10)に対して、白飛びしている部分をスペキュラとして切り出し、スペキュラ部分を白色、それ以外の部分を黒色とした二値画像(図 11(a), (c), (e))を生成する。その後、白色部分の周りをグラデーション状にぼかす画像処理を行い、光沢部分にグレア錯視を誘発するための投影画像(図 11(b), (d), (f))を生成する。ただし、これらのような投影を操作対象に投影すると、スペキュラ以外の部分の輝度が暗くなりすぎるため、全体的に一定の輝度を付加して背景部分の投影をグレーにする。

印刷した図 10 の画像に対して投影した結果を図 12 に示す。今後、さまざまなシーンに対して適用し、提案手法の有効性について評価する。

6 まとめ

本論文では、プロジェクションによって、グレア錯視が誘



(a)Peppers (b)Spoon (c)Coin
 図10 一般的なシーンのグレー画像

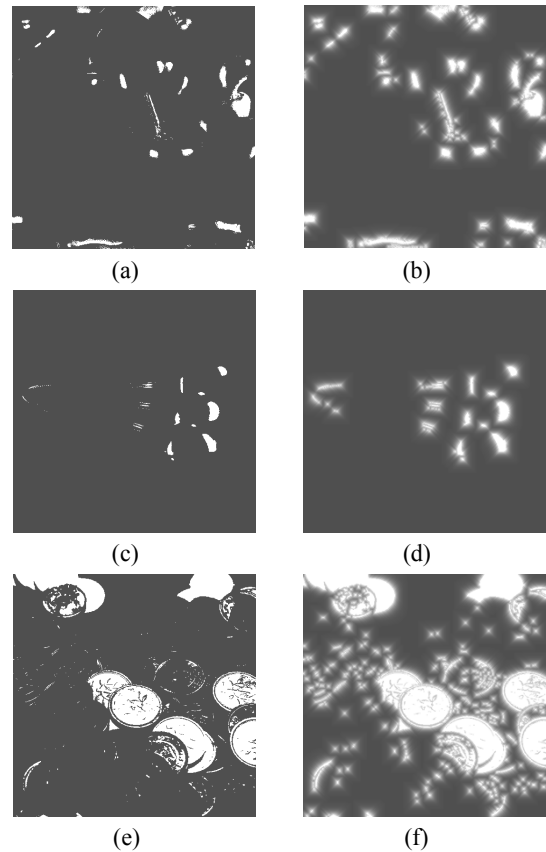
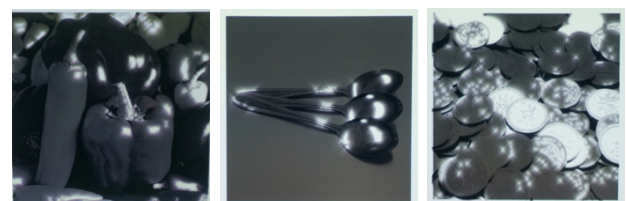


図11 投影画像



(a)Peppers (b)Spoon (c)Coin
 図12 投影結果

発されることを示した。次に、従来のコントラスト強調よりも明るく知覚されることを示す手法を提案した。実験では、プロジェクタでグレア錯視を応用した輝度強調とダイナミックレンジを大きくすることでコントラストを強調する手法を比較した。被験者実験を行なった結果、グレア錯視が誘発され、コントラスト強調よりも明るく知覚されることが確認された。したがって、プロジェクタの投影性能を知覚的に超えるコントラスト強調が行える可能性が示唆された。

今後は本稿で提案した一般的なシーンへの応用方法を様々なシーンに適用し、評価実験を行い提案手法の有効性を評価する。また、カラー画像への対応についても検討し、グレア錯視を応用した効果的な光沢感の操作を実現する予定である。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 17H01781 および MEXT 科研費 18H05008 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Raskar, Ramesh and Low, Kok and Welch, Greg.: Shader Lamps: Animating Real Objects with Image-Based Illumination, University of North Carolina at Chapel Hill, 2000.
- [2] Bimber O., Emmerling A., Klemmer T.: Embedded Entertainment with Smart Projectors. IEEE Computer 38, 1 (2005), 56–63.
- [3] Ashdown M., Okabe T., Sato I. and Sato Y.: Robust content-dependent photometric projector compensation, Proceedings of the IEEE International Workshop on Projector-Camera System (PROCAMS), pp. 60–67 (2006).
- [4] Amano T., Komura K., Sasabuchi T., Nakano S., Yamashita S.: Appearance Control for Human Material Perception Manipulation. 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2012), November 11-15, 2012.
- [5] Kawabe T., Fukiage T., Sawayama M., Nishida S.: Deformation lamps: A projection technique to make static objects perceptually dynamic. ACM Trans. Appl. Percept. 13, 2 (Mar. 2016), 10:1–10:17.
- [6] Akiyama R., Yamamoto G., Amano T., Taketomi T., Alexander P., Chritian S., Kato H.: Light Projection-Induced Illusion for Controlling Object Color, 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), 18-22 March 2018.
- [7] Tamura, Hideki and Nakauchi, Shigeki and Koida, Kowa.: Robust brightness enhancement across a luminance range of the glare illusion, Journal of Vision (2016), 16(1):1, 1-13.
- [8] Amano T., Kato H.: Appearance control using projection with model predictive control. In Proceedings of the 2010 20th International Conference on Pattern Recognition (Washington, DC, USA, 2010), ICPR '10, IEEE Computer Society, pp. 2832–2835.

© 2019 by the Virtual Reality Society of Japan (VRSJ)