



クレイク・オブライエン効果を応用した投影対象の存在感を消すプロジェクションマッピング技術の一考察

A study on projection technique which removes projection target existence using C-O effect

松本 侑大, 天野 敏之

Yudai MATSUMOTO, and Toshiyuki AMANO

和歌山大学 システム工学部 システム工学科

(〒640-8510 和歌山県和歌山市栄谷 930, {s226258, amano}@wakayama-u.ac.jp)

概要: クレイク・オブライエン効果は図形の輪郭付近で明度を指数的に変化させ、輪郭で明暗差を提示すると、その輪郭を挟んだ領域で知覚的な明度差が生起する錯視現象である。本研究では、プロジェクタを用いた重畳投影でこのような明度提示を非対称に行うと、暗部の知覚が実際の明るさよりも暗くなる現象に着目し、プロジェクションマッピングにおいて非投影部分の存在感を消す方法について考察する。

キーワード: 拡張・複合現実, 空間型拡張現実, クレイク・オブライエン効果

1. はじめに

1.1 研究背景

臨場感の高いプロジェクションマッピングを行うためには投影対象の無投影部分の輪郭や模様が見えないようにする必要がある。当然ながら光学的に負の明るさの投影をすることはできないため、臨場感の高い演出を行うために外光が全くない状況で実施すれば良いが、そのような照明環境を実現することは困難な場合が多い。そこで、本研究では、錯視を用いることで知覚的に外光を暗くし、非投影部分の存在感を消す方法について考察する。

1.2 関連研究

錯視を応用したプロジェクションマッピング技術が多数提案されている。Kawabe らの変幻灯[2]では、物体の輪郭に形状歪みを提示する白色の差分画像を重畳投影することで動き知覚を錯覚させ、ナイーブな投影補償を行うことなく形状変形を知覚させる技術を提案している。Akiyama らの研究[3]では、補色への色彩操作など、光学的に実現不可能な光投影による色彩操作を、操作対象の周辺に有彩色の照明を行い、色の恒常性を応用することで知覚的に実現している。また、Nagata らの研究[4]では、プロジェクタの投影性能を超える重畳投影による光沢感強調を、グレア錯視を応用することで知覚的に実現する方法を提案している。本研究は、前述のような錯視を応用したプロジェクションマッピング技術として、クレイク・オブライエン・コーンスイート効果 (C-O 効果) に着目し、非投影部分の明度を知覚的に暗くする技術の実現を試みる。

C-O 効果を用いた研究として、末竹ら[5]は 2 色覚者が特定の色の組み合わせの色の違いを識別しにくい問題に対して、コントラストを改善する手法を提案している。この手法では、C-O 効果により知覚的な明度は変化するが、赤色が朱色に変わるなどの色彩変化は発生しない。これはすなわち、光学的な特性は変化させずに知覚的な明るさだけを変化させることができることを示唆している。この特性を応用すれば、プロジェクションマッピングにおいて投影コンテンツの印象を変化させずに、投影コンテンツはより明るく、環境照明により視認される無投影部分はより暗く知覚させることが可能であり、これによって無投影部分の存在感をなくすことが期待される。

1.3 本研究の目的

本研究では、環境照明によって非投影部分の輪郭やテクスチャが見える状況において、プロジェクタからの投影光量を強くすることなく、非投影部分の存在感を薄くする方法について考察する。具体的には、C-O 効果を誘発させるパターンを物体輪郭に投影することで、非投影部分の知覚的な明度を低下させる。しかし、錯視を誘発させるために非投影部分にパターンの投影を必要とする場合、その投影によって非投影部分の明度が上昇するため、本末転倒である。そこで、本研究では非投影部分にパターン投影を必要としない非対称なパターンを用いた C-O 効果の誘発によって非投影部分の存在感を消す方法について考察する。

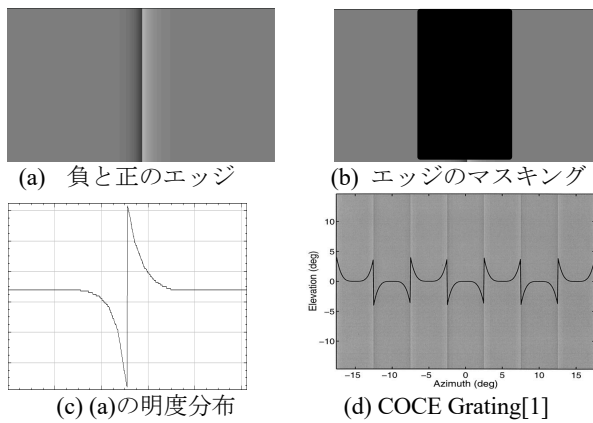


図1：C-O効果の例

2. C-O効果を用いた知覚的な明るさ操作

2.1 クレイク・オブライエン・コーンスウィート効果

C-O効果は輝度の不連続性が錯視的な明るさを生み出す錯視である[1]。図1にC-O効果の例を示す。

図1(a)は、C-O効果による錯視を誘発させるパターンである。この横ラインの明度分布は図1(c)に示すように、境界を挟んで左側は指数関数的に暗く（負のエッジ）、右側はそれと対照的に明るくなるエッジ（正のエッジ）が描画されているが、エッジ部分以外の明度は同じである。図1(b)のように境界部分をマスクすると、左右の領域の明度が同一であることが確認できる。図1(a)ではC-O効果によって主観的なコントラストが生起され、境界部分を挟んで左は暗く、右は明るく知覚される。このエッジを繰り返し描画した、図1(d)に示すCOCE Gratingを描画すると、エッジの明度が伝搬されてエッジの間を同じ明度で埋めたように知覚される処理（filing-in process）が行われ、矩形の波形で明度が変化するパターンとして知覚されることが知られている[1]。

2.2 投影によるC-O効果の誘発

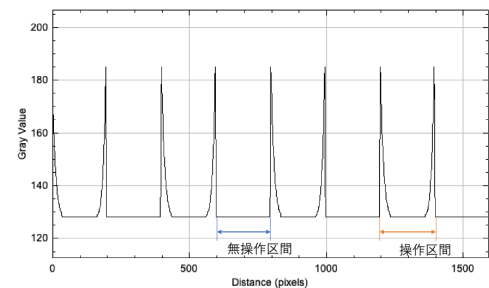
プロジェクションマッピングにおいて非投影部分の知覚的な明度を減少させるためには、図1に示したエッジを投影部分と非投影部分の境界に提示すれば良い。しかし、負の光量の投影をすることは物理的に不可能である。この解決策として、負のエッジを表現するために、投影画像にオフセットを加える方法が考えられるが、この場合、非投影部分で期待される知覚的な明度は無投影時の明度にしかない。そこで、本研究では、図2に示す負のエッジを削除してその区間の明度を一定にした非対称的なエッジの提示を考える。

本研究ではこのパターンにおいて、正のエッジで挟まれた領域を操作区間、負のエッジを削除した区間を無操作区間と呼ぶ。このような非対称なパターン（以降、非対称COCE Gratingと呼ぶ）であれば、錯視の誘発のために非投影部分への投影は必要が不要になる。

C-O効果は前述のfiling-in processで説明されるため、操作区間はエッジのピークの明るさが知覚されると予想される。これに対して、負のエッジを削除した無操作区間ではfiling-in processは行われませんが、網膜神経節細胞による

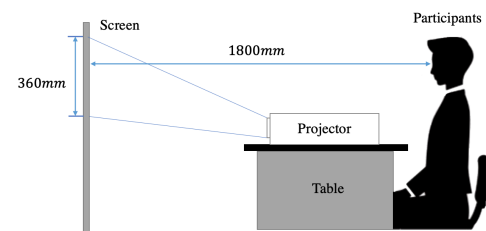


(a) 非対称的なエッジ

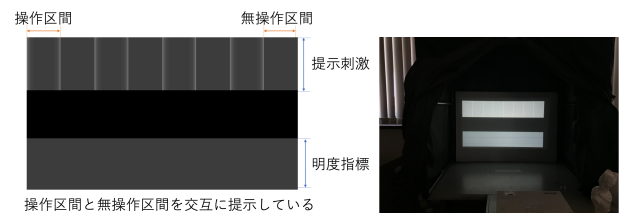


(b) (a)の明度分布

図2：非対称COCE Grating



(a) 提示位置



(b) 提示刺激

(c) 提示の様子

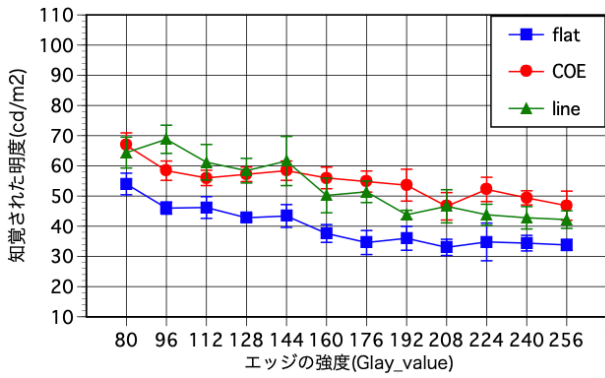
図3：実験環境

低周波空間周波数の抑制 [6]と filing-in process を考えれば、非対称COCE Gratingは明度オフセットが0となる矩形波パターンとして知覚され、無操作区間の知覚的な明度は相対的に元よりも暗く知覚されることが期待できる。そこで、本研究ではまず、このような非対称的なパターン投影によって、操作区間と無操作区間の知覚的な明度を調査する。

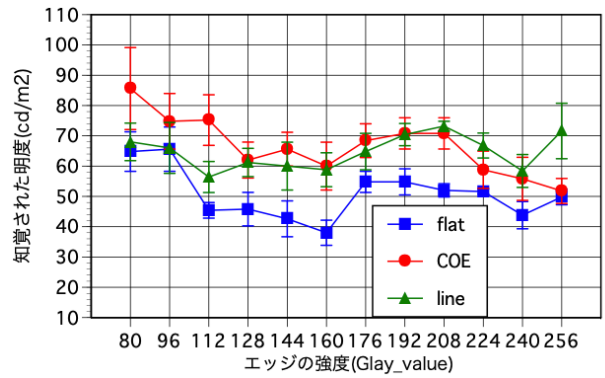
3. 非対称COCE Gratingの知覚的な明度調査

3.1 実験1:非対称COCE Gratingの投影によるC-O効果

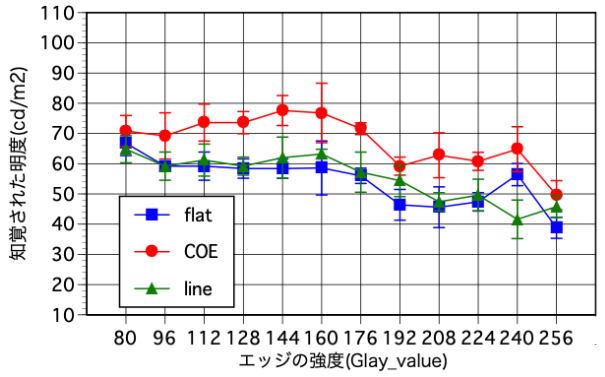
本研究では、投影によって非投影部分の明度を知覚的に暗くする技術の実現の可能性を模索するためにあたり、まず非対称COCE Gratingの操作区間と無操作区間の知覚的な明度の調査を行う。



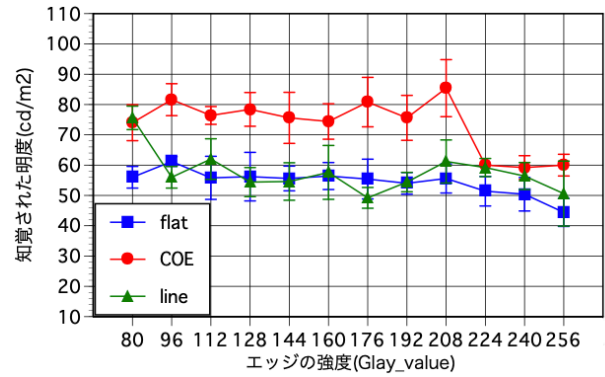
(a) 実験参加者 A



(b) 実験参加者 B



(c) 実験参加者 C



(d) 実験参加者 D

図 4 : 知覚的明度の調査結果

3.1.1 実験手順

1920×1200 画素, 3000lmのプロジェクタ (acer H6510BD) を用い, 図 3 (a)のように, 投影の大きさを 630mm×360mm (視角でおよそ 20deg) として提示する. 実験参加者は, 図 3 (b)のように投影面から 1800mmに着座して両眼で提示刺激を観察し, 提示刺激の操作区間 (COE) と同じ明るさに見えるように下部の明度指標の明るさをキー操作で調整する. その後, 無操作区間 (flat) についても同様の操作を行う. このような操作を 12 段階のエッジの強度で行うタスクを 5 回ずつ行い, 明度指標の操作区間と無操作区間の知覚的な明度を調べる. ただし, COE の中心部分および無操作区間の輝度は 90cd/m²で固定した. また, 環境照明はプロジェクタからの光のみとする.

3.1.2 実験結果

実験には 21 歳から 23 歳の視機能健全な男性 4 名 (矯正を可とする両眼の視力が 0.7 以上で, 目の障害を持たない) が参加した. この結果を図 4 に示す. これらのグラフで, COE は操作区間, flat は無操作区間について, それぞれのエッジの強度の提示で知覚された輝度を示している (line は実験 2 で説明). いずれの結果でもエッジの提示強度 96cd/m²から 208cd/m²の区間で COE と flat に明確な知覚明度の差が確認できる. また, 明るく知覚された COE でも実際の輝度 90cd/m²を超えることはなく, COE, flat のいずれにおいても概ねエッジの提示強度と知覚された明度に負の相関が確認できる.

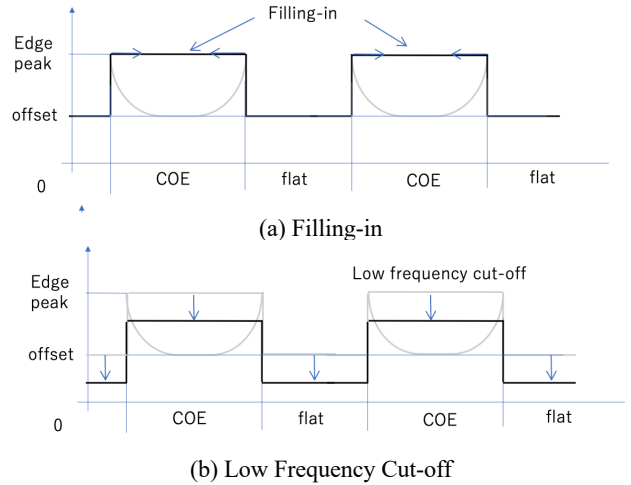


図 5 : 非対称 COCE Grading の知覚メカニズム

3.1.3 考察

非対称 COCE Grading でも, 明度差が生起することが確認できたが, 操作区間の知覚明度は下がった. C-O 効果を説明する filling-in process に従えば, 操作区間では知覚的な明度補完が図 5(a)のように行われることが考えられる.

実験では flat および COE の中心部は 90cd/m²で提示したが, いずれの被験者も知覚明度がこの値を超えていない. この理由としては, 図 5(b)のように低周波空間周波数の抑制によって直流成分が削除され, 全体的に知覚される明度が下がったことが考えられる. また, COE, flat のいずれも概ねエッジの提示強度と知覚明度に負の相関が確認できることから, 瞳孔収縮による明度低下も考えられる.

実験後の被験者からの聴取では, エッジ部分が白い線に

見えたというコメントもあった。もし、COE による filling-in は働いていなかったとすると、事前知識によって操作区間と無操作区間が区別されていたことになる。次節ではこの検証を行うために、COE の正のエッジの指数関数状の変化を削除し、明度がステップ状に変化する直線描画に変えたパターンについて実験を行う。

3.2 実験 2: エッジの明度を均一にした場合

本節では、COE の正のエッジの指数関数状の変化を削除し、明度がステップ状に変化する直線描画に変えた場合でも、明度差が生起するか検証する。

3.2.1 実験手順

投影する刺激を図 6 として、実験 1 と同じ環境および実験参加者で実験を行う。提示刺激は、非対称 COCE Grating の操作区間の内側に描画されている COE を削除し、直線描画に変えたものを使用する。すなわち、操作区間、無操作区間の区別がなく、 $90\text{cd}/\text{m}^2$ の背景にエッジとして直線を描画されている。この刺激を Bar pattern と呼ぶ。

3.2.2 実験結果

図 4 の line に Bar pattern の操作区間および無操作区間の結果を示す。ただし、いずれの実験参加者も、操作区間と無操作区間で同じ明度を回答したため、グラフの line は両方の結果を示す。この結果から、輪郭部付近の明度を急激に変化させるだけでは明度差が生起しないことが分かる。しかし、もとの明度($90\text{cd}/\text{m}^2$)より暗く知覚されている。

3.2.3 考察

Bar pattern では操作区間と無操作区間で明度差が生起しなかった。パターンの違いがないため、当然であるが、これより事前知識の影響がないことが確認できる。ただし、瞳孔収縮による知覚明度の低下は生じるものと思われる。

本実験の知覚的明度は実験参加者 A と B では COE に、C と D では flat に近づいているが、いずれの実験参加者においても $60\text{cd}/\text{m}^2$ 付近を回答していることから、実験 1 の非対称 COCE Grating で働く低周波空間周波数の抑制の強度に差があったと解釈するのが適切である。

実験参加者 C と D では flat に近いことから、瞳孔収縮による知覚的明度低下よりも無操作部分を暗く知覚させることはできないが、実験参加者 A と B については、非対称 COCE Grating を利用することで、無操作部分の知覚的明度を無投影の状態よりも暗くすることができる可能性を示唆している。

4. 投影対象の周囲の存在感減弱についての考察

図 7 に存在感減弱のアイデアを示す。例えば(a)に示す線画を描画する場合、領域 A と B で知覚的に明度差は発生せず、瞳孔収縮による明度低下のみが生じる。この線画を(b)に示すように非対称 COCE Grating に置き換えることで領域 B は A よりも知覚的明度が低下し、星型を投影している投影対象の存在感の低減が期待できる。



図 6 : 提示刺激 (Bar pattern)

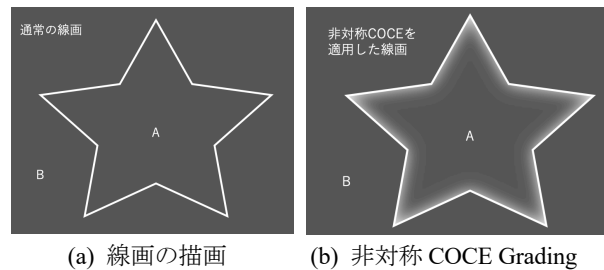


図 7 : 投影対象の存在感減弱のアイデア

5. まとめ

本論文では、非対称 COCE Grating によって C-O 効果が誘発されることを確認した。また、Bar pattern の刺激との比較から、実験参加者によっては、非投影部分の知覚的明度を無投影の状態よりも暗くすることができる可能性が確認できた。今後は、平面の任意の形状に対して非対称 COCE Grating を適応し、その周りの知覚的明度が下がるか検証し、投影対象の存在感減弱について調査を進める予定である。

謝辞 本研究の一部は科研費 20H04230, 20H00608 による。

参考文献

- [1] M.P.Davey et al. : The spatiotemporal properties of the Craik-O'Brien-Cornsweet effect are consistent with 'filling-in', Vision Research, pp. 2037–2046, 1998.
- [2] T. Kawabe et al.: Deformation Lamps: A Projection Technique to Make Static Objects Perceptually Dynamic, ACM Trans on Applied Perception, vol. 13, no. 2, pp. 10:1–10:17 (2016).
- [3] R. Akiyama et al.: Light Projection-Induced Illusion for Controlling Object Color, 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pp.1-2 (2018).
- [4] S. Nagata, T. Amano: Gloss Enhancement beyond Projector Performance using the Glare Illusion, The 26th Int'l Display Workshops, 3D4/VHF4/3DSA4-4, 2019.
- [5] 末竹規哲: クレイク・オブライエン錯視効果に基づくデジタルカラー画像の色覚バリアフリー高速色変換システムの構築, Journal of the Franklin Instit
- [6] A. Derrington, P. Lennie: Spatial and temporal contrast sensitivities of neurones in lateral geniculate nucleus of macaque. The Journal of physiology, 357, 219–240, 1984.