

色彩を豊かにする非写実的カラーノーツの着色モデルと自動化手法

葛籐形¹ 飯田全広¹

概要: 従来のグラフィックス技術は、三次元物体のリアルな描写を可能にするが、これらの方法は柔軟性に欠け、芸術家の作品に見られる表現力を再現することは難しい。そのため、非写実的レンダリング (Non-Photorealistic Rendering, NPR) という、より芸術的なレンダリング手法が生まれた。イラストレーションの技法の中には、「隠し色 (Color Notes)」と呼ばれる手法があり、この手法は画面の色彩を豊かにする一方で、物体の知覚や画面バランスに影響を与えることはない。現実の物体自体には本来、色が存在しないが、人間の目が異なる波長の光刺激を受け取ることで、色彩豊かな世界を認識している。色彩はしばしば感情に作用し、豊かな色彩はより豊かな感情を生み出す。本研究の目標は、ユーザーが簡単に非写実的な着色モデルを生成できるようにすることであり、これらのモデルが「隠し色」の効果を伴うことで、アーティストの作品が与える印象を再現することである。非写実的レンダリングにおける色彩の応用を研究し、スケッチの関係を保ちながら画面の視覚的表現力をいかに向上させるかを明らかにしたいと考えている。画面をより芸術的にすることを目指しながらも、本研究では画家の作品における色彩の使用手法を明確し、純粋に感性的な表現を数値として計算可能な形に変換する。

キーワード: コンピューターグラフィックス, 画像情報, 感性情報処理

A Non-Photorealistic Color Notes Coloring Model and Automation Method for Enriching Colors

XIAOTONG GE^{†1} MASAHIRO IIDA^{†1}

Abstract: Traditional graphics techniques provide realistic representations of three-dimensional objects, but these methods often lack flexibility and fail to achieve the expressive effects found in artists' works. To address this, Non-Photorealistic Rendering (NPR) has emerged as a more artistic rendering approach. In illustration and painting techniques, there exists a method called Color Notes, which enhances the richness of colors in an image while maintaining the perception of objects and overall balance. This artistic technique is highly compatible with NPR. In reality, objects do not inherently possess color; rather, human eyes perceive colors through the stimulation of different wavelengths of light. Color significantly influences human emotions, and richer color usage can evoke stronger emotional responses. The goal of this study is to enable users to easily generate NPR shading models with Color Notes effects, creating an impression as if crafted by an artist. By exploring the application of colors in NPR, this research aims to reveal how visual expressiveness and emotional impact can be enhanced while preserving the fundamental sketching relationships. While this study aims to enhance artistic expression, it also seeks to clearly analyze the application of colors in artists' works, transforming purely intuitive descriptions into quantifiable computational values.

Keywords: Computer Graphics, Image Information, Affective Information Processing

1. はじめに

写真技術の発展が絵画を完全に代替しなかったように、レンダリング技術もリアルな表現のみが目的ではない。非写実的レンダリング (Non-Photorealistic Rendering, NPR) は、現実を忠実に再現するのではなく、一定の視覚的ルールを踏襲しつつ、芸術的な表現を重視する技術である。

本研究ではカラーノーツ (Color Notes) と呼ばれる絵画技法に着目する。カラーノーツとは、画面全体のバランスや物体の視認性を損なわずに、明度を維持しつつ色彩の豊かさを強化する手法である。この技法をデジタル環境に応用することで、非写実的レンダリングにおける色彩表現をより柔軟かつ直感的に制御できる可能性がある。

従来、カラーノーツの適用は画家の経験とセンスに依存し、手作業で各オブジェクトの色彩を調整する必要があった。しかし、この方法では時間と手間がかかり、一貫性のある色彩設計が困難である。そこで本研究では、カラーノーツ技法を

計算可能な手法として再構築し、シェーダーによって自動的に適用できるモデルの開発を試みる。具体的には、人間の視覚特性を考慮しながら明度を維持したまま色彩を調整する a 方法を検討し、特に明暗境界や影の部分に適用するルールを定める。また、従来の 3D モデルを入力し、カラーノーツを適用した NPR シェーダーを出力することで、デジタルアート制作の効率化と表現力の向上を目指す。

本研究では、芸術的な表現を強化するだけでなく、カラーノーツの技法を科学的に分析し、数値化・計算可能な手法へと昇華させることを目指す。これにより、非写実的レンダリングの新たな可能性を探求し、デジタルアートの表現力を向上させることが期待される。

2. 関連研究

2.1 非写実的レンダリング (NPR)

NPR[1][2]はリアルな光学特性を再現するのではなく、ス

¹ 熊本大学大学院
Graduate School of Kumamoto University

タイライズされた表現を実現する技術である。Toon Shader やグラデーションテクスチャを用いた手法が一般的であるが、これらの技法では色彩の自動調整が困難である。

2.2 HSV 色空間と課題

HSV 色空間[3]は色相 (H)、彩度 (S)、明度 (V) に分けて処理できるため、色相調整には適している。しかし、HSV の明度は人間の視覚における明るさ感とは異なり、色相シフト時に明度が変化する問題がある。

3. 方法

3.1 絵画技法 Color Notes

本章では、芸術的な描画理論とコンピュータグラフィックスの技術を組み合わせ、Color Notes 技法の理論的背景を探求し、そのデジタルアートへの応用を科学的に検証することを目指す。

3.1.1 絵画技法の紹介

芸術家になぜそのように色を選んだのか尋ねても、答えは「調色板で色を混ぜる方法を知らない、調色はピアノのように、私はただ鍵盤を叩いているだけだ」—— Morgan Weistling[4].

しかし、実際には、色彩のいくつかの法則をまとめることができる：

1. 白黒の関係と明暗を決定 – 複雑なディテールを省略し、全体のバランスを整える。
2. 冷暖色と彩度の調整 – 光の強さと色相の関係を考慮し、適切な彩度を選択する。
3. カラーノーツによる色彩の拡張 – 物理的な制約を超え、直感的に色彩を追加する。

最初に、画面の白黒グレーの関係、明るさを決める。第二に、冷暖を加え、彩度の分布を決定する。そして第三に、本研究で追加するもの、物理的制約からの解放により、色彩をさらに豊かにする手法、Color Notes である。

Color Notes のルールは、スケッチの関係 (明暗の関係) を変えずに色を変えることで、色をより豊かに見せることができる。カラーは絵画に追加の生命力を与えることができる。Richard Schmid のような有名な画家の作品は、この見解を証明している。彼の色彩は非常に表現豊かであり、彼の絵を近くで観察すると、彼は単一の色ではなく、色の体系を使用している。しかも、彼の豊かな色彩は色の明るさを変えることはない。色彩を豊かにするには黒白灰をすてなければならない考え方にとらわれず、シンプルな明るさの関係でカラーを付けることにはより豊かな色を生み出すことができる。



図 1. Richard Schmid の風景画における明度分布

図 1 は Richard Schmid の絵の明度変化を示した。青色の壁に緑、オレンジなどの色を見ることができ、これらの絵をモノクロモードに変換したら、脱線した色の存在はわからなくなる。

3.1.2 Color Notes の現実性

ここで特筆すべき点は、初めて聞いた人はこの手法を環境色と混同するかもしれないが、実際には環境色とは異なる。環境色は周囲の環境に基づいて決定され、明るさに影響を与える。例えば、テーブルに置いた球の最も暗い部分は底部ではなく中心にあり、底部は光を反射し、明るさに影響を与える。

これは完全に感覚的な追加に見えるかもしれないが、調査の中で現実世界でも同様の現象が見られることがわかった。

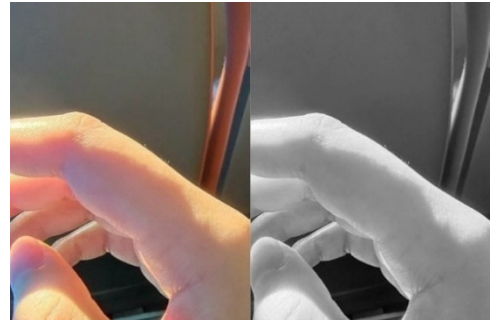


図 2. 現実の中の「隠し色」

図 2[5]は現実の中の「隠し色」のある写真である。これはガラスの色が画面に与える影響で、青色が画面をより美しく透き通ったものに見せる。したがって、「隠し色」は、明度には影響しない、色相には影響を与えるガラスが周囲にあるとして理解できるから、画面を美しくするために、明るさの規則に従えであれば、どのような色を入れても合理的である。

3.1.3 Color Notes の位置

カラーノーツを適用するには、余白の確保が不可欠である。細かすぎる場所にカラーノーツを配置すると、周囲のディテールに埋もれてしまい、結果的にまったく目立たなくなってしまう。そのため、カラーノーツは滑らかでシンプルな部分に配置することで、「シンプルながら洗練された」視覚効果を生み出すことができる[6]。本研究は、カラーノーツ技法を研究することで、NPR が芸術的表現において持つ可能性をより明確にすることを目指している。

3.2 提案手法の概要

本研究の目的は、このような絵画技法 (隠し色) を再現することであり、以下の要点に基づいて再現を試みる。

1. 最優先の原則は、人間の視覚における明度を一定に保つことであり、以下のすべての項目はこの原則のもとに構築される。
2. 隠し色は細部の多いモデルや画面には適用しにくく、余白を活用することで効果を発揮する技法である。そのため、非写実的レンダリング (NPR) が最も適した再現手法となり、本研究の実験も NPR を基盤とする。
3. 隠し色は追加の色彩技法であり、完全に主観的に追加可能なものである。そのため、本研究では色相変更をスライダーによって調整可能な機能として実装する。
4. 色を加える位置も完全に主観的に決定できる。一般的には、暗部や明暗の境界線に追加する例が多いが、明るい部分に加える場合も存在する。したがって、使用者に自由な選択肢を提供するために、マスクを利用した位置制御を可能にする。

5. エッジのグラデーション. 調整された色が画面上で唐突に見えないようにするため, エッジ部分にはグラデーション効果を適用する.
6. 作家の作品と同様の明度判定手法を用いる. すなわち, 同じ明度モードで見たときに違いが生じないことを基準として評価する.

3.3 明度を維持するための2つの方法

画家が技法を教える際, 「目を細めて見たときに似ている色を探す」と表現することがある. これは非常に抽象的な概念であり, 実際に操作するには時間がかかる. なぜなら, 色相や彩度も人間の目が捉える明るさに影響を与えるため, HSL や HSV のカラーパレットで単純に縦軸を固定するだけでは正しく明度を維持することはできない. これは, アルゴリズムと人間の視覚の感度の違いに起因する問題である.

色は人間の知覚によって生じる現象であり, 光の一般的な属性ではない. 色の知覚は人間の主観に依存し, 物理的な分布とは必ずしも一致しない. 本研究では, 色相や彩度を調整しながら明度を維持する手法を探索し, 以下の2つの異なる解決策を採用した.

1つは RGB 加重計算に基づく手法, もう1つは LMS 色空間の非線形変換に基づく手法である. これらの方法はそれぞれ異なるアプローチで明度を正確に制御し, 知覚の一貫性と技術的な実装のしやすさのバランスを取っている.

3.3.1 人間の視覚認識の原理

人間の視覚における色の認識メカニズム

人間の色彩の知覚は, 網膜上の錐体細胞 (Cone Cells) によって主に担われている. 錐体細胞は3種類に分類され, それぞれ特定の波長の光に敏感である. L 錐体 (Long-wavelength sensitive cones): 長波 (赤寄り) の光に最も敏感. M 錐体 (Medium-wavelength sensitive cones): 中波 (緑寄り) の光に最も敏感. S 錐体 (Short-wavelength sensitive cones): 短波 (青寄り) の光に最も敏感.

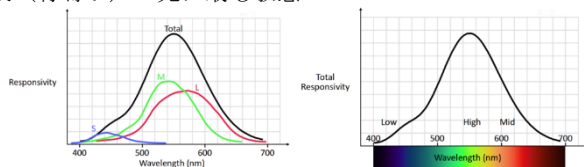


図3. 視錐体細胞の応答特性

図3[7]は錐体細胞の応答特性と総和を示している錐体細胞の分布と割合は色彩知覚の基盤を形成している. 一般的な分布比率は次のとおりである. L 錐体: 約 60%. M 錐体: 約 30%. S 錐体: 約 10%. ここで重要なのは, L, M, S の錐体をそれぞれ赤緑青の細胞と呼ぶのは正しくないという点である. 実際の錐体の応答曲線を見ると, ピーク波長が必ずしも赤緑青と一致しているわけではない. しかし, 3種類の細胞の応答特性から最終的な RGB の感覚が得られるという点において, 便宜的にそう表現されることがある.

錐体細胞の分布が不均等であるため, 人間の目は異なる色に対して異なる輝度 (明るさ) を感じる. たとえば, 緑色や黄色は, L と M 錐体が同時に強く刺激されるため, 他の色よりも明るく感じられる. 一方で, 青色は S 錐体の寄与が小さいため, 比較的暗く感じられる.

このような生理学的特性があるため, 人間の色彩知覚は主観的であり, かつ複雑な特性を持つ.

明度の非線形感知

明度 (Luminance) は, 人間の目が光の明暗を知覚する尺度である. しかし, この知覚は線形的ではない. 人間の明度知覚は対数的な関係に近い. 低輝度領域では, わずかな

変化でも大きく明るさを感じる. 高輝度領域では, 明るさの変化をほとんど感じなくなる. 具体的な例を挙げると, 物理的な光の輝度が 10 から 20 に増加すると, 明るさが 2 倍に感じられる. しかし, 100 から 110 に増加しても, 人間の目にはほとんど変化が感じられない.

この非線形特性を考慮するために, 多くの色空間では非線形変換 (立方根変換など) を導入し, 人間の視覚に基づいた明度補正を行っている.

色彩の合成特性

色は物理的に存在するものではなく, 脳内での知覚反応にすぎない. 光学理論においても, 「何色の光」と表現することは厳密には誤りであり, より正確には「脳内の色彩感覚」と呼ぶべきである. 混合信号の色彩知覚, たとえば, 450nm (青) の光と 630nm (赤) の光が同時に錐体に届いた場合, 人間の脳はそれらを統合し, 中間の紫色として知覚する. この紫色は実際の光のスペクトルには存在しない (光の波長として紫色の単一波長はない).

同色異譜現象 (Metamerism)

異なるスペクトルを持つ2つの光源が, 人間の目には同じ色として見えることがある. これは, 両者が同じ割合で錐体細胞を刺激するために起こる現象である. このように, 色彩は単純な物理的な特性ではなく, 視覚認識のメカニズムによって決まるため, 単純な輝度測定では正確に知覚される色を推定することができない.

錯覚

人間の視覚は, 周囲の色とのコントラストによって錯覚を引き起こし, 明度の認識に誤差が生じる. 本研究において保持する「明度の不変性」とは, この錯覚要素を排除した上での明度を指す.

3.3.2 【手法1】 RGB の重み付け

1. 原理と計算式

可視色域を二次元化し, 輝度情報を除外すると, 色度図 (Chromaticity Diagram) を得ることができる.

CIE 1931 xy Chromaticity Diagram

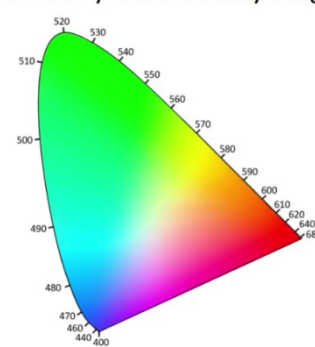


図4. CIE1931xy 色度図

図4 CIE1931xy 色度図[7]である. はこの色度図では, 曲線部分が異なる波長のスペクトル色を示し, 直線部分は紫の軌跡 (Purple Line) を示している. 色度図を用いることで, 異なる色の組み合わせを直感的に理解できる. 任意の2点を結ぶ直線上には, それらの中間色が存在する. 現代のディスプレイ技術は, 依然として3つの基本色 (RGB) を組み合わせる原理に基づいて動作している. そのため, どのような色変換を行う場合でも, 色の組み合わせの本質的な基盤が RGB の3点 (赤・緑・青) であることを考慮しなければならない.

色彩は異なるスペクトル構成で同じ色に見えることがある (同色異譜現象) という原理, 色は混合信号によって知覚されるという原理, ディスプレイが RGB を基にすべての

色を再現しているという原理に基づき、本研究では RGB の各成分に適切な重みを与えることで、知覚的に一貫した輝度制御を実現する。

CIE 1931 色空間は、国際照明委員会 (CIE) によって定義された標準色空間であり、人間の視覚に基づいて設計されている。CIE 1931 は、現代の色彩科学の基礎とされ、実験的な研究に基づき、人間の視覚を 3 つの仮想的な基色 X, Y, Z に分解したモデルである。CIE XYZ 空間の重要な特徴として、Y 成分が人間の明度知覚と直接対応すること L 錐体と M 錐体の応答の加重平均に基づいており、人間の視覚的な明るさ感覚と一致することが挙げられる。本研究において、明度を維持するための原則は、CIE XYZ 空間における Y 成分を適切に調整することで達成可能である。

CIE 1931 色度図は、XYZ 空間を正規化して得られた二次元表現であり、輝度成分を除外した色相と彩度のみを示す。この図を利用すると、ディスプレイ上の色混合の効果を視覚的に理解できる。異なる 2 点を結ぶ直線上の中間点が、その 2 色を混合した際の結果色となる。同色異譜現象、色が混合信号として知覚される現象、および RGB を基に色を再現するディスプレイ技術の原理に基づき、RGB に対する適切な加重を行うことで、人間の視覚的な明度感覚に一致する調整が可能である。

RGB 加重法は、人間の視覚特性を考慮し、赤(R)、緑(G)、青(B)の各成分に異なる重みを付けて明度を計算する方法である。この方法では、RGB 色空間の輝度に対する人間の知覚の寄与度と反応し、視覚の明度を調整することができる。標準的な RGB 加重計算式は以下ようになる:

$$L = w_R \cdot R + w_G \cdot G + w_B \cdot B$$

ここで、一般的には使用される重みは以下の通りです:

$$w_R = 0.299, w_G = 0.587, w_B = 0.114$$

これらの値は、人間の目が長波長の光に対してより多くの感度を持つことを反映している。

RGB の入力色を YIQ[8]空間に変換する:

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.595716 & -0.274453 & -0.321263 \\ 0.211456 & -0.522591 & 0.311135 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

色相の偏移

色相を θ だけ回転 (偏移) する:

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ Q \end{bmatrix}$$

ここ θ は amount_hue (色相変化量) であり、ユーザが調整可能。

彩度の偏移

彩度を s の割合で調整する。

$$I'' = (1 - s) \cdot 0 + s \cdot I'$$

$$Q'' = (1 - s) + s \cdot Q'$$

ここで、 s は amount_sat (一定する彩度調整量) であり、 $s=1$ の時彩度を維持し、 $s=0$ の時完全に無彩色 (グレー) となる。

逆変換

最終的な色相・彩度調整後の YIQ を RGB に戻すには:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.9563 & 0.6210 \\ 1.0 & -0.2721 & -0.6474 \\ 1.0 & -1.1070 & 1.7046 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y \\ I'' \\ Q'' \end{bmatrix}$$

最終的な RGB 値は元の RGB 値と補間 (mask を利用して) し混合される:

$$\text{rgbCol} = (1 - \text{mask}) \cdot \text{color.rgb} + \text{mask} \cdot (R', G', B')$$

2. RGB 加重法のメリットと限界

メリット: 計算がシンプルであり、リアルタイム処理が可

能である。sRGB に適合し、既存のレンダリング技術と互換性がある。デバイスや環境による影響が少ないため、安定した結果が得られる。

デメリット: 非線形な明度感知を考慮していない。人間の視覚では、輝度の増減に対する感度が一定ではなく、高輝度領域では明るさの変化を感じにくくなる。LMS 色空間の錐体細胞の応答特性を反映していないため、より正確な視覚モデルを使用する場合には適していない。

3.3.3 【手法 2】 LMS 色空間における非線形変換

1. 原理と計算式

LMS 色空間は、人間の視覚モデルに基づく色表現の一つであり、L (長波)、M (中波)、S (短波) の三つの錐体細胞の応答を利用して使用される。

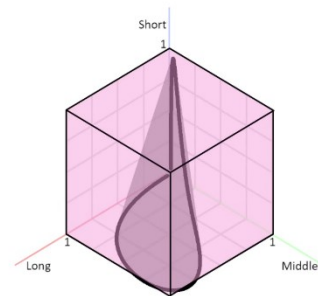


図 5.LMS 空間

図 5 は LMS の応答を座標軸とする LMS 空間のイメージ図である[7].

RGB 色空間から LMS 色空間へ変換するための行列は以下の通りである[9].

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412221 & 0.536332 & 0.051445 \\ 0.211903 & 0.680700 & 0.107397 \\ 0.088302 & 0.281719 & 0.629979 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

この変換を適用することで、色の情報が錐体細胞の応答に基づいた座標系にマッピングされる。

2. 非線形変換の必要性

LMS 空間では、人間の視覚における明度の非線形特性を考慮するために、ガンマ補正や立方根変換を適用することが重要である。人間の目は、暗い部分では明度の変化に敏感であり、明るい部分では明度の変化に鈍感になる。この特性を反映するため、以下のような非線形補正を行う:

$$L' = L^{1/3}, M' = M^{1/3}, S' = S^{1/3}$$

この変換を適用することで、視覚的に均一な輝度を得ることができる。

3. 色空間での色相・彩度調整

明度を維持しながら色相や彩度を変更するには、LMS 空間の L 成分を固定したまま、M と S の成分に回転行列を適用する:

$$\begin{bmatrix} M' \\ S' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M \\ S \end{bmatrix}$$

ここで、 θ は色相回転の角度である。

この方法により、L 成分 (明度) を維持しながら、M, S 成分のみを回転させることで、明度が変わらないまま色相を変更できる。

彩度の調整は、a, b 成分に対してリニア補間を適用、

$$a'' = (1 - s) \cdot 0 + s \cdot a'$$

$$b'' = (1 - s) \cdot 0 + s \cdot b'$$

最終的に、回転・彩度調整後の Oklab[10] を RGB に戻す:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \text{oklab to linear srgb} \begin{bmatrix} L \\ a'' \\ b'' \end{bmatrix}$$

最後に、RGB 値を mask に基づいて補間し、元の色と混合する:

$$\text{rgbCol} = (1 - \text{mask}) \cdot \text{color.rgb} + \text{mask} \cdot (R', G', B')$$

4. 実験

4.1 実験環境とテスト手法

表 1 で実験環境を示す。

表 1. 実験環境

項目	詳細
操作システム	Windows 11
開発プラットフォーム	Unity 2021.3.11fl
ディスプレイ	sRGB 色域, 解像度 1920x1080
開発言語	C#, ShaderLab/HLSL
評価ツール	Adobe Photoshop (バージョン 21.0.2) After Effects (バージョン 17.0.1)

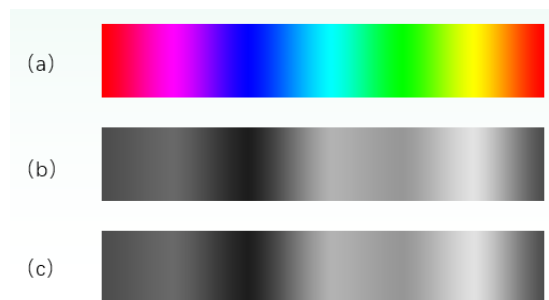


図 6. (a)テスト色相図, (b)photoshop 明度モード, (c)After Effects 明度モード

図 6 に(a)テスト色相図, (b)photoshop 明度モード, (c)After Effects 明度モードを示す。これらは本研究で調査した人間の視覚に基づく明度テスト方法であり, 本研究ではこれらの手法を用いて明度の変化を検証する。



図 7. 実験用モデル © UTG/UCL

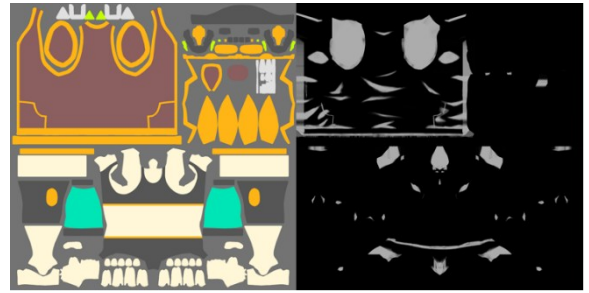


図 8. 実験用テクスチャ, マスク © UTJ/UCL

図 7 および図 8 は実験用モデル[11]であり, 実験で使用するテクスチャとマスクである。色の変化はマスク範囲内で適用され, カラーノーツの効果が選択された領域のみに反映されるようにする。

4.2 実験結果

4.2.1 効果テスト 色相シフト



図 9. 色相シフトと明度モード

図 9 はそれぞれ HSV 色相シフトと明度モード, 手法 1 色相シフトと明度モード, 手法 2 色相シフトと明度モードである。

観察すると, HSV 手法では明度の変化が明確に見られるのに対し, 手法 1 および手法 2 は色相の変化が顕著でありながら, 明度の変化が見られない。これにより, 明度を維持しながら色相の調整を実現できていることが確認できる。

彩度シフト

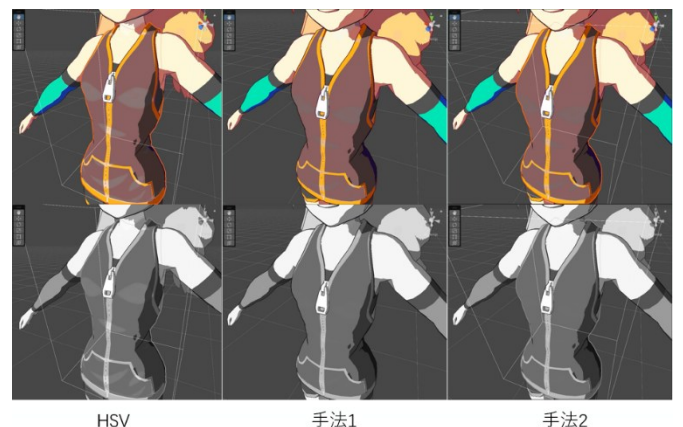


図 10. 手法 2 彩度シフトと明度モード

図 10 はそれぞれ HSV 彩度シフトと明度モード、手法 1 彩度シフトと明度モード、手法 2 彩度シフトと明度モードである。

観察すると、HSV 手法では依然として明度の変化が大きく見られるのに対し、手法 1 および手法 2 は引き続き明度を適切に維持している。

ここで補足すると、本実験で使用した明度テストの基準では、手法 1 と手法 2 の両方が良好な結果を示した。しかし、別の方法によるテストでは、手法 1 に明度の変化が確認されたのに対し、手法 2 は依然として安定した結果を保持していた。なお、これに関する詳細な考察は、紙面の都合上、本論文では省略する。

4.2.2 性能テスト

表 2 は Unity Stats データを記録した表である。

表 2.Unity Stats データ

項目	HSV	手法 1	手法 2
CPU メインスレッド時間 (ms)	11.8	12.5	12.8
レンダースレッド時間 (ms)	0.4	0.5	1.3
Batches	72	72	72
Triangles (k)	123.9	123.9	123.9
Vertices (k)	81.4	81.4	81.4
画面解像度	1171x656	1114x656	1114x656

1. 主要なパフォーマンス指標の比較

CPU メインスレッド時間

HSV レンダリング: 11.8 ms 手法 1: 12.5 ms (+5.9%) 手法 2: 12.8 ms (+8.5%)

分析: 手法 1 と手法 2 は、HSV レンダリングと比較して CPU 負荷が増加している。

最大 1.0 ms の増加は、色彩変換処理(輝度計算や色相変換など)の追加処理によるものと考えられる。

レンダースレッド時間

HSV レンダリング: 0.4 ms 手法 1: 0.5 ms (+25%), 手法 2: 1.3 ms (+225%)

分析: 手法 2 のレンダースレッド時間が大幅に増加(+225%)しており、GPU 負荷が著しく増加している可能性が高い。

これは、非線形色彩変換(LMS 空間変換、ガンマ補正など)による計算負荷の増加が要因と考えられる。

画面解像度

HSV レンダリング: 1171x656 手法 1 & 手法 2: 1114x656

分析: 手法 1 と手法 2 は、解像度が 57 ピクセル(横方向)低下しているが、これは性能への影響は小さいと考えられる。

4.2.3 比較とまとめ

表 3 は二つの手法のまとめである。

表 3.手法比較

項目	RGB 加重法	LMS 色空間変換
計算コスト	低い(高速)	高い(処理負荷が増加)
視覚的正確性	限定的	高い
人間の非線形視覚を考慮	なし	あり
リアルタイム適用	可能	可能

本研究では、明度を維持しながら色相と彩度を調整するために、計算コストの低い RGB 加重法と、視覚的に正確な LMS 非線形変換法の両方を比較し、適用範囲を明確にする。

5. 今後の課題

5.1 より精度の高い明度テスト手法

本研究では、Photoshop および After Effects の明度モードを利用して明度変化を評価したが、明度の視覚的検証は主観的な要素を含むため、より客観的で正確な評価手法の確立が求められる。

より正確な明度評価の手法の検討: 人間の視覚特性を考慮した測定手法の探索する。高精度の物理ベースレンダリング(PBR)環境での比較実験が必要である。

芸術家による評価の実施: 提案したモデルが実際の芸術表現としてどの程度適切であるかを検証するため、プロのイラストレーターや画家へのアンケート調査を行う。主観的な美的評価と、色彩の理論的整合性との相関を探ることで、より実用的なモデルの構築を目指す。

5.2 位置のリアルタイム変化への対応

現在の手法では、カラーノーツの適用範囲は静的なマスクによって決定されており、リアルタイムでの位置変動には対応していない。光源の変化や影の位置の変動といった動的な環境要因とは既に適切に連携されており、色彩の不自然な変化も発生していない。したがって、今後の課題は動的変更にも焦点を当てることになる。

6. おわりに

本研究では、非写実的レンダリング(NPR)技術と「Color Notes(カラーノーツ)」という絵画技法を融合し、明度を維持しながら色彩表現を強化する方法を探索した。Color Notes は、従来の環境光による色彩変化とは異なり、明度を変えずに自由に色を加えることで、より豊かで調和のとれた視覚効果を生み出す技法である。

この目標を達成するため、本研究では、芸術家の色彩使用の調査、人間の視覚特性の分析、レンダリングモデルの改良の 3 つのアプローチを採用した。既存の作品分析から Color Notes の適用パターンを抽出し、明度維持のための視覚錯覚の排除を考慮したアルゴリズムを検証した。さらに、アーティストが自由に色と位置を調整できるシェーダーを開発し、マスク処理やエッジブレンド技術を活用して自然な色彩統合を実現した。

本研究の成果により、手作業による Color Notes の適用を直感的かつ効率的に自動化することが可能となった。アーティストは感性を生かしながら、負担を軽減しつつ芸術的な色彩効果を作り出せる。

今後の課題として, 明度評価手法の精度向上や動的ライティング・影の変化に対応するシェーダーの開発が挙げられる. 本研究の成果は, NPR 技術における色彩表現の発展に寄与し, ゲーム, アニメーション, デジタルアートなどの分野で新たな表現の可能性を提供する. 今後の研究を通じて, Color Notes を活用したレンダリング技術のさらなる発展を目指す.

参考文献

- [1] P.-P. J. Sloan, W. Martin, A. Gooch, and B. Gooch: "The lit sphere: a model for capturing NPR shading from art," in Proc. Graphics Interface 2001 (GI '01), Canadian Information Processing Society, CAN, pp. 143–150 (2001)
- [2] A. Gooch, B. Gooch, P. Shirley, and E. Cohen: "A non-photorealistic lighting model for automatic technical illustration," in Proc. 25th Annu. Conf. Comput. Graph. Interact. Tech. (SIGGRAPH '98), ACM, New York, NY, USA, pp. 447–452, DOI: 10.1145/280814.280950.(1998)
- [3] "HSV 色空間," Wikipedia 日本語版. (オンライン), 入手先 [〈https://ja.wikipedia.org/wiki/HSV%E8%89%B2%E7%A9%BA%E9%96%93〉](https://ja.wikipedia.org/wiki/HSV%E8%89%B2%E7%A9%BA%E9%96%93) (参照 2025-2-14) .
- [4] M. Bucci: "Colour Notes - 10 Minutes To Better Painting - Episode7," YouTube, (オンライン), 入手先 [〈https://www.youtube.com/watch?v=jFoKmX0LfCs&t=322s〉](https://www.youtube.com/watch?v=jFoKmX0LfCs&t=322s) (参照 2025-2-14) .
- [5] 阿嘶嘶: "藏色技巧," REDnote, (オンライン), 入手先 [〈http://xhslink.com/a/1QO1NgYQZbG4〉](http://xhslink.com/a/1QO1NgYQZbG4) (参照 2025-2-14) .
- [6] 东馆日常: "藏色竟然还要留白? 你知道吗?" (オンライン), 入手先 [〈https://www.bilibili.com/video/BV1H24y1Q7PA/〉](https://www.bilibili.com/video/BV1H24y1Q7PA/) (参照 2025-2-14) .
- [7] K. Saydaki: "The Amazing Math behind Colors!," YouTube, Aug.13,2022. (オンライン), 入手先 [〈https://www.youtube.com/watch?v=gnUYoQ1pwes〉](https://www.youtube.com/watch?v=gnUYoQ1pwes) (参照 2025-2-14) .
- [8] M. W. Schwarz, W. B. Cowan, and J. C. Beatty: "An experimental comparison of RGB, YIQLAB, HSV, and opponent color models," ACM Trans. Graph., vol. 6, no. 2, pp. 123–158, Apr. (1987)
- [9] H. Shinoda and I. Fujieda: 色彩工学入門, 森北出版社株式会社, (2007)
- [10] B. Ottosson: "Oklab: A perceptual color space," Blog Post, 2021. (オンライン), 入手先 [〈https://bottosson.github.io/posts/oklab/〉](https://bottosson.github.io/posts/oklab/) (参照 2025-2-14) .
- [11] ntny, M. Urakami, M. Maejima, Aintsu, Pondero, and N. Kobayashi: 実践! ユニティちゃん トゥーンシェーダー2.0 スーパー使いこなし術, Unity Technologies Japan, 2019.