

ユーザーの調色能力向上を支援するアプリの開発と評価

佐々木 嵩也^{1,a)} 宮田 一乗^{1,b)}

概要：塗料の調色は建築物や車の外装・プラモデル制作など、様々なシチュエーションで造形物の見た目を目的の色にするために行われる。その学習方法は実空間での調色を繰り返し、多くの実経験を積んでいくことが主流である。しかし実空間での調色を繰り返すことは時間・金銭・環境的な面で多大な学習コストがかかる。そこで本研究ではコンピュータ上でリアルな調色がシミュレーションでできる学習アプリを開発した。本研究の目的は、調色の学習コストを低下させること、そしてアプリを用いた学習が、実空間のみの学習と同等以上の調色能力の獲得を支援できるかを検証することである。

1. はじめに

塗料の調色は建築物や車の外装・プラモデル制作など、様々なシチュエーションで造形物の見た目を目的の色にするために行われる。現在、塗料調色能力を高めるための学習は、実空間での調色を繰り返し、多くの実経験を積んでいくことが主流である。国家資格である塗料調色技能士 [1] でも受験資格に3年以上の実務経験が必要なことから、実経験が重要視されていることが伺える。しかしながら実空間での調色学習は多くの学習コストがかかってしまう。大きな学習コストは3つ存在し、一つは時間である。一つの調色結果を確認するだけでも塗料の調合や塗装・乾燥などで少なくない時間を要してしまう。次に金銭的なコストである。塗料は購入する必要があるため、学習時間が長くなればそれだけ金銭的な負担も大きくなる。最後に環境的な面である。学習に際し、調合した塗料や塗装した物はゴミとして処分しなければならない場合もある。

本研究ではこのような学習コストを低下させつつ、ユーザーが実空間のみで行う学習と同等以上の調色能力を獲得できるよう支援する学習支援アプリを開発した。このアプリケーションは実空間ではなくコンピュータ上でリアルな調色シミュレーションが可能である。本稿ではこのアプリのシステムとその評価について述べる。

2. 関連研究

2.1 コンピュータ上での調色モデル

コンピュータ上の調色モデルは様々なものが存在する。例えば Sugita と Takahashi ら [2] の RYB モデル

は,Red, Yellow, Blue の3軸の空間で3色を混ぜ合わせてできる8種類の色を設定し、その間を補完することでリアルな絵の具の調色表現を目指した。Simonot と Hébert [3] らの Additive-Subtractive モデル、および Subtractive-Additive モデルは加法混色と減法混色を組み合わせる手法で実物の調色結果に近い色を表現した。そして中でも精度が高いのは塗料の吸収係数 K と散乱係数 S を使用して調色後の塗料の反射率を求める Kubelka-Munk の理論 [4] である。

2.2 Kubelka-Munk の理論

調色における Kubelka-Munk の理論は、各塗料の吸収係数 K と散乱係数 S には加法性が成り立つため、調色後の吸収係数 K_{mix} と散乱係数 S_{mix} は以下の式で表される [5]。

$$\begin{aligned} K_{\text{mix}}(\mathbf{c}, \lambda) &= \sum_{i=1}^N c_i K_i(\lambda), \\ S_{\text{mix}}(\mathbf{c}, \lambda) &= \sum_{i=1}^N c_i S_i(\lambda), \end{aligned} \quad (1)$$

ここで c は各塗料の濃度である。また調色後の吸収係数と散乱係数は各波長ごとに求める必要がある。そして $K_{\text{mix}}, S_{\text{mix}}$, 調色後の反射率 R_{mix} は次のような関係がある。

$$R_{\text{mix}}(\mathbf{c}, \lambda) = 1 + (K_{\text{mix}}/S_{\text{mix}}) - \sqrt{(K_{\text{mix}}/S_{\text{mix}})^2 + 2(K_{\text{mix}}/S_{\text{mix}})}. \quad (2)$$

このため、塗料について、各波長ごとの吸収係数 K と散乱係数 S が既知であれば、調色後の各波長ごとの反射率を求めることが可能である。

2.3 Kubelka-Munk 理論が用いられた調色ツール

Lu ら [6] はユーザーが選択したカラーチャートと

¹ 北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術専攻

^{a)} s2310060@jaist.ac.jp

^{b)} miyata@jaist.ac.jp

Kubelka-Munk 理論を基に特定の顔料やその特性を再現するデータ駆動型のモデルを提案した。また, SOCHOROVÁ と JAMRIŠKA ら [7] は, 現行のデジタルペインティングツールにおける色の混ぜ合わせが実物とは全く異なることを解決するため, RGB 空間内で Kubelka-Munk モデルを使用し従来の RGB 表現を保持しつつ, リアルな絵具の調色を表現できるツールを開発した。

2.4 関連研究との比較

本研究のアプリケーションは Kubelka-Munk 理論を採用した調色シミュレーションを行う。関連研究では調色モデルやそれを使用したデジタルペイントの調色表現等は見受けられるが, 調色学習や調色者自身の調色能力向上にフォーカスしたものは管見の限り見受けられない。本研究では Kubelka-Munk 理論による調色シミュレーションを, 実空間のみでの調色学習と同等以上の調色能力向上効果を得るために活用する。

3. 塗料の調色について

塗料の調色は絵の具の混ぜ合わせのイメージとは大きく異なり, 調色結果は塗料の特性によって大きく左右される。ここで述べた塗料の特性とは, その塗料を混ぜた際の色の変化の方向性(色みの変化や明度の変化)やその強さである。例えば一般的には赤と青を 1:1 で混ぜると紫になるイメージがあるが, 実際はそうではない。図 1 に示すように赤と青の塗料を混ぜ合わせた結果は茶色に近くなる。これは二つの塗料の色が同じ強さではないこと, 混ぜることで彩度と明度が低下することが原因である。精度の高い調色を行うためには各塗料の特性を理解し, 適切な比率で配合を行うことが重要である。



図 1: 赤と青の調色 (1:1)

4. 調色学習アプリケーション

開発した調色学習アプリケーションでは, ユーザーはア

プリから正解色として提示された色の再現を目指し, 塗料と量を選択して調色していく。セクション 3 で述べたように精度の高い調色には塗料の特性の理解と適切な比率での配合が不可欠であるため, アプリはこれを強く意識しながら調色作業が行えることを目指した。このセクションでは開発した調色学習アプリを構成する要素と支援領域について述べる。アプリケーションの全体図を図 2 に示す。



図 2: アプリの全体図

4.1 塗料パネル

図 3 は調色する塗料とその量を選択するパネルである。色の三原色に基づき, シアン・マゼンタ・イエローの三種類と, 明度を調整するためのブラック・ホワイトの 2 種類の計 5 種類を用意している。各塗料ごとに量 (0.1, 0.5, 1.0) を決定するボタンがあり, 細かい調整が可能である。これを押すと対応した塗料が選択した量で Kubelka-Munk 理論に則って調色計算される。Kubelka-Munk 理論に用いる各塗料の各波長ごとの吸収係数 K と散乱係数 S は株式会社 GSI クレオスより販売されている MR.Color シリーズのシアン・マゼンタ・イエロー・ブラック・ホワイト (図 4) の分光反射率から導出したものを使用している。

4.1.1 各塗料の K, S の導出

まず, シアン・マゼンタ・イエロー・ブラック・ホワイトに対して分光光度計を使用して各波長 (400nm-700nm, 20nm 間隔) の反射率を測定する。そして, ホワイトを除く 4 種類の塗料において全体量を 1 とし, ホワイトを 0.3, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9 の割合で加えた 5 種類のサンプルを作成する。これらも各波長 (400nm-700nm, 20nm 間隔) の反射率を測定する。測定した各波長ごとの反射率は式 (2) を用いて, K/S に変換する。求めた各塗料 (ホワイトを混ぜたものも含む) の各波長の K/S 値を用いてそれぞれの塗料の K, S を以下の式より導出する [8][9]。この時シアン・マゼ

ンタ・イエロー・ブラックの K, S はホワイトの S に対する相対値として表される。ホワイトの S は 1 とする。

$$K(\mathbf{C}_W, \lambda) = C_W \omega_A \frac{\omega_M - \omega_W}{\omega_A - \omega_M} \quad (3)$$

$$S(\mathbf{C}_W, \lambda) = C_W \frac{\omega_M - \omega_W}{\omega_A - \omega_M} \quad (4)$$

ここで C_W はホワイトの濃度, ω_A は塗料の K/S , ω_M はホワイトを混ぜたサンプルの K/S , ω_W はホワイトの K/S 値である。こうして図 5 のように各塗料について、濃度ごとの、そして各波長ごとの K, S を求めることができる。サンプルを取得していない濃度の K, S は線形補間を行うことで求めることができる。

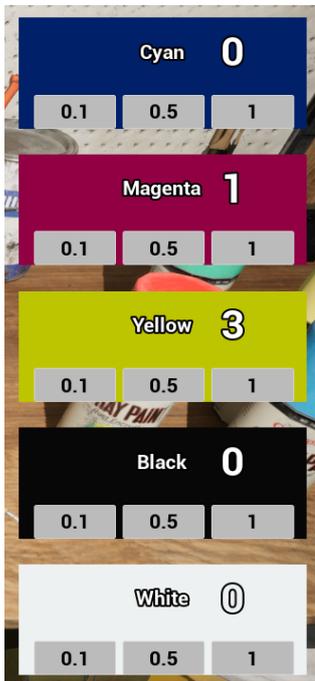
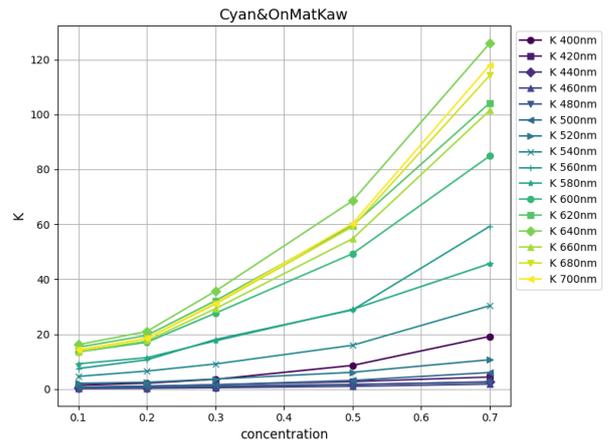


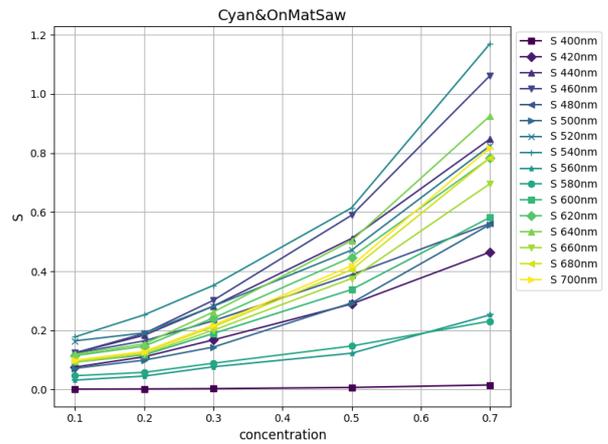
図 3: 塗料パネル



図 4: 使用した塗料



(a) シアンの各濃度, 各波長ごとの K



(b) シアンの各濃度, 各波長ごとの S

図 5: シアンの K, S

4.2 色相環・明度バー

図 6 は左が色相環, 右が明度バーである。調色結果の色みや明度が, これらのどこに位置するかをカーソルで可視化している。カーソルは二つ前までの位置を表示しているため, ユーザーは選択した量の塗料を混ぜ合わせたときに色みや明度がどの方向にどの程度変化するかをより強く意識することが期待できる。

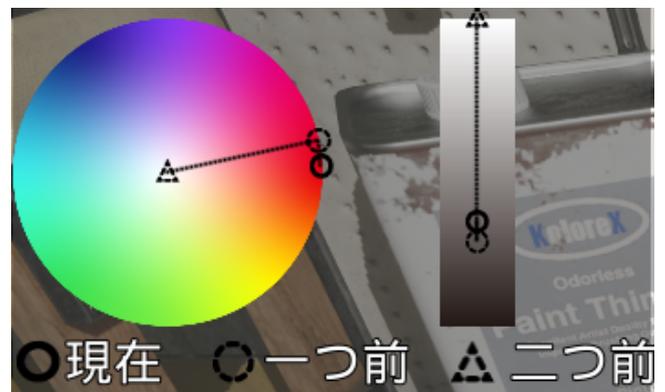


図 6: 色相環と明度バー

4.3 履歴パネル

ユーザーが行った操作とそれによる調色結果が履歴として蓄積される(図7)。パネル上部は背景に追加した塗料の色が表示され、テキストで操作回数と追加した塗料の名前・量が表示される。パネル下部は追加した塗料の調色結果が表示される。自身が行った操作がどのように色味や明度を変化させたのかを視覚的にわかりやすく比較できるため、より使用した塗料の特性へ理解が深まることが期待できる。



図7: 履歴パネル

4.4 正解色用・調色用モデル

図8で左が正解色用モデル、右が調色用モデルである。正解色用モデルにはユーザーが目標とする正解色が塗られている。調色用モデルにはユーザーが調色パネルで選択した塗料と量で調色計算された結果が適用される。二つのモデルには平板を採用している。これは実際の調色では平板に試し塗りをすることが多いためである。また、照明は固定だが視点は自由に操作可能であり、画面上でマウスをドラッグすることで様々な角度から調色結果を確認できる。



図8: 左: 正解色用モデル 右: 調色用モデル

4.5 回答パネル

調色時は Answer ボタンが表示されており、これを押すと現在の調色用モデルの色が正解色と同様かどうか判定する。正解・失敗のいずれの場合も、正解の組み合わせ・塗料の追加操作回数・使用した塗料の数が表示される(図9)。

4.6 調色学習過程内でのこのアプリの支援領域

このアプリは各塗料の調色結果を即座に確認できる。しかしながら実際の調色においては、調色時の塗料とそれを塗布して乾燥した状態の塗料は若干色が異なる。このアプリでは調色後の乾燥した状態を表示するため、このギャッ

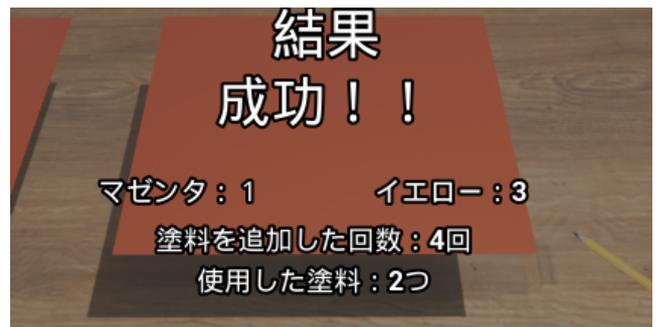


図9: リザルト画面

プを学習することはできない。そのため、このアプリの支援領域は塗料の特性・適切な比率での配合の理解とし、調色時と乾燥時の色のギャップは実空間の調色作業で学習するものとする。

4.7 アプリの学習シナリオ

ユーザーのアプリの学習シナリオについて以下に示す。

- 1) 調色用モデルの色を正解色用モデルと同様にすることを目的とする
- 2) ユーザーは塗料パネルから調色用モデルの色に混ぜる塗料と量を選択する。調色結果は正解色用モデルに適用される。
- 3) 色相環・明度バーや履歴パネルを参照しながら調色操作を繰り返し、正解色と同様になったと判断したら Answer ボタンを押す。
- 4) 正解色と調色結果が同様であれば成功、そうでなければ失敗となる。

5. 評価実験

開発したアプリを使用した学習が実空間のみの調色学習と比べてどの程度の調色能力向上効果があるかを検証する予定である。

5.1 実験方法

実空間でのみ調色学習を行うグループとアプリを活用して学習するグループに分け、その後両グループともに実空間で提示された正解色を目指して調色を行い、その結果を比較して効果を検証する実験を検討している。実験手順を以下に示す。

1. **グループ A の調色学習:** グループ A には本稿で提案するアプリを用いて調色学習を行わせる。当人が塗料の特性や配分に対する理解が十分であると判断するまで、学習を繰り返す。
2. **実空間での調色学習:** アプリでの学習を終えた後、グ

グループ A には実空間での調色学習を行わせる。これは実験の主催者である筆者から提示される正解色を再現することを目的とする。これは調色時と乾燥時の色のギャップについて理解を深めるために行う。当人が十分に理解できたと判断されるまで学習を継続し、これをもってグループ A の学習を終了とする。

3. **グループ B の実空間調色学習:** グループ B には、グループ A の中で学習にかかった最長時間と同じ時間だけ、実空間での調色学習を行わせる。グループ A の時と同様に実験の主催者である筆者から提示される正解色を再現することを目的とする。
4. **調色結果の比較:** 最後に、両グループとも実空間で提示された正解色を目指して調色を行う。その結果を比較し、アプリを用いた調色学習の効果を検証する。

5.2 評価方法

この時の評価項目として現在有力なものをいかに述べる。

- 目標色への近似度 ΔE
- 塗料の追加回数
- 混ぜた塗料の数
- 完成までの時間

正解色との近似度は調色した塗料を分光光度計で色差を測定することで入手できる。当然ながら色差が少ない方が調色能力が高いと言える。また国家資格である調色技能士は目標色をできるだけ少ない原色数と短時間で表現できることが求められている。このことから塗料の追加回数・混ぜた塗料の数・完成までの時間を評価項目として採用した。これらは値が小さい方が調色能力が高いと言える。グループ A とグループ B の結果を比較し、グループ A の方の結果の方が良ければ本稿のアプリが調色能力の向上に効果的であるといえる。

6. まとめ

本研究では、調色の学習コストを低減しつつ、ユーザーが実空間における学習と同等以上の調色能力の習得が期待できる調色学習アプリケーションを開発した。Kubelka-Munk 理論を採用したことで精度の高い塗料の調色を表現できた。またアプリケーションは塗料の調色で重要な塗料の色の方向性や強さといった特性や適切な比率を強く意識できるようにデザインした。今後はこのアプリの実空間のみの調色学習と比較した際の学習効果について検証していく

参考文献

- [1] 厚生労働省：わざのとびら 塗料調色技能士
- [2] Junichi Sugita and Tokiichiro Takahashi:Computational RYB Color Model and its Applications(2017)
- [3] Lionel Simonot and Methieu Hébert: Between additive and subtractive color mixings: intermediate mixing models(2014)
- [4] P. Kubelka, F. Munk,:Ein Beitrag zur Optikder Farbanstriche, (1931)
- [5] D. R. Duncan:The colour of pigment mixtures. Proceedings of the Physical Society(1940)
- [6] Jingwan Lu, Stephen DiVerdi, Willa Chen, Connelly Barnes, and Adam Finkelstein:The colour of pigment mixtures. RealPigment: Paint Compositing by Example(2014)
- [7] ŠÁRKA SOCHOROVÁ, ONDŘEJ JAMRIŠKA:Practical Pigment Mixing for Digital Painting(2021)
- [8] SHINADA NOBORU:Kubelka-Munk 理論とその応用 (1969)
- [9] X-Rite:39. CCM-3 調色計算：二定数法 (2022)