

東京工業大学工学院  
学士特定課題研究報告書

光沢感知覚に対する色度情報の寄与

指導教員 永井 岳大 准教授

令和2年1月

提出者

系 情報通信系

学籍番号 16B16967

氏名 渡辺 侑真

|         |  |  |
|---------|--|--|
| 指導教員認定印 |  |  |
| 系主任認定印  |  |  |

## 光沢感知覚に対する色度情報の寄与

指導教員 永井 岳大 准教授

情報通信系

16B16967 渡辺 侑真

研究の背景と目的はカクカクシカジカ．研究の背景と目的はカクカクシカジカ．研究の背景と目的はカクカクシカジカ．研究の背景と目的はカクカクシカジカ．

従来の研究成果はカクカクシカジカ．従来の研究成果はカクカクシカジカ．従来の研究成果はカクカクシカジカ．従来の研究成果はカクカクシカジカ．

本研究では新たにカクカクシカジカの検討を行なった．本研究では新たにカクカクシカジカの検討を行なった．本研究では新たにカクカクシカジカの検討を行なった．本研究では新たにカクカクシカジカの検討を行なった．

その結果，カクカクシカジカの成果と得ることができた．その結果，カクカクシカジカの成果と得ることができた．その結果，カクカクシカジカの成果と得ることができた．その結果，カクカクシカジカの成果と得ることができた．

従来の成果に比べて本研究で得られた成果は大変優れている．従来の成果に比べて本研究で得られた成果は大変優れている．従来の成果に比べて本研究で得られた成果は大変優れている．従来の成果に比べて本研究で得られた成果は大変優れている．

残された課題としてはチョメチョメが挙げられる．残された課題としてはチョメチョメが挙げられる．

# 目 次

|     |                  |    |
|-----|------------------|----|
| 第1章 | 序論               | 1  |
| 1.1 | 研究背景 . . . . .   | 1  |
| 1.2 | 本研究の目的 . . . . . | 2  |
| 1.3 | 本論文の構成 . . . . . | 2  |
| 第2章 | 実験1              | 3  |
| 2.1 | 目的 . . . . .     | 3  |
| 2.2 | 仮説 . . . . .     | 3  |
| 2.3 | 実験方法 . . . . .   | 4  |
| 2.4 | 実験結果 . . . . .   | 10 |
| 第3章 | 実験2              | 11 |
| 3.1 | 目的 . . . . .     | 11 |
| 3.2 | 実験方法 . . . . .   | 11 |
| 3.3 | 実験結果 . . . . .   | 12 |
| 第4章 | 結論               | 17 |
|     | 謝辞               | 18 |
|     | 参考文献             | 18 |

# 第1章

## 序論

### 1.1 研究背景

ヒトは物体を見た時に、瞬時にその質感を把握することができる。網膜像を生み出す物理的要因として、照明環境、物体の光学特性、物体の三次元形状があるが、それらは強くかつ複雑に相互作用する。この中で、質感とは主に物体の光学特性に対応する知覚であると考えることができる。この枠組みで考えれば、網膜像から質感を推定する問題はいわゆる不良設定問題であるにも関わらず、ヒトが容易に質感を知覚できることから、その仕組みを明らかにするための研究がここ15年ほど活発に行われてきた。

質感の種類は非常に多種多様であるが[[todo: 引用](#)]、その質感の中でも、光沢感を知覚する際の視覚系の情報処理の仕組みについては多く研究されてきた。光沢感とは、物体の表面の光学的反射特性に対応する心理的な属性である。例えば、パチンコ玉のように表面が非常に平滑な平面においては、鏡面反射が支配的であり、周辺環境の明瞭な像が映り込むことにより非常に強い光沢感が知覚される。一方で布のように表面に凹凸が多く存在する平面においては、拡散反射が支配的であり、光沢感はほとんど知覚されない。

光沢感については、多くの場合その輝度条件と光沢感知覚の関連性について多くの報告がなされてきた。[\[todo: 先行研究を引用\]](#)

例えば、物体における鏡面反射成分の面積・コントラスト・シャープネスが光沢知覚に寄与することが先行研究によって明らかとなっている。

しかし、輝度と知覚的な明るさは必ずしも一致するとは限らない。例えば、刺激の輝度は同一でも、Helmholtz-Kohlrausch効果による明るさの増幅は色相によって異なることが知られている。では、光沢知覚には輝度と明るさ感のうちどちらが寄与しているのだろうか。また、Nishidaら(2010)はハイライトの色をつけすぎるとハイライトがハイライトに見えなくなり、それに伴い光沢感が大幅に減衰することを報告した。しかし、それは極端に不自然な例であり、日常の光沢感知覚に対する色情報の寄与に関する研究ではない。

## 1.2 本研究の目的

## 1.3 本論文の構成

## 第2章

### 実験1

#### 2.1 目的

実験1では、輝度を一定とした複数の色の刺激に対して知覚される光沢感を被験者ごとに測定を行う。色度ごとの光沢感を定量化することで、光沢感に色度情報が寄与しているかどうかを明らかにすることを目的とする。また、以下に記す仮説が成立するかどうかを明らかにする。

#### 2.2 仮説

第1章で述べたとおり、表面の輝度成分が光沢感知覚に寄与していることは既知である。しかし、輝度が変わると当然知覚的な明るさも変わるため、光沢感に寄与しているのが知覚的な明るさ感なのか輝度情報そのものなのかについては明らかになっていない。輝度と知覚的な明るさ感が分離される現象として Helmholtz-Kohlrausch 効果 (以下 H-K 効果) が知られている。これは、同一の輝度を有する色でも彩度が高いほど明るく感じられ、特に青・紫・赤紫・赤などの色相を有する色がより明るく見えるという効果である。このように、有彩色刺激を採用し H-K 効果を利用することにより、輝度の明るさを分離することが可能となる。

本研究で検証する仮説は、拡散反射成分と鏡面反射成分の知覚的な明るさ感のコントラストが主に光沢感に寄与しているというものである。従来の研究から、拡散反射成分と鏡面反射成分の輝度コントラストが知覚的光沢感に強く寄与することが明らかになっている。[参考文献] 本実験で検証するのは、この輝度コントラストに起因するものであったという可能性に関する仮説となる。ここで、鏡面反射成分と拡散反射成分の色度情報を利用して明るさ感のみを変化させれば、輝度の効果と明るさの効果を検証できるはずである。反射成分のうち、拡散反射成分は鏡面反射成分に比べて多くの場合には低輝度である。そこで反射成分を拡散反射成分と鏡面反射成分に分け、拡散反射成分のみに輝度を変えずに色度を変化させ有彩色を付与する処理を行う。このとき、もし上述の

仮説が正しいとすれば、H-K効果による明るさ感の増幅が顕著な色度では、拡散反射成分の明るさ感がH-K効果により向上することに起因し、他色度に比べて相対的に明るさ感のコントラストが大きく減少するため、光沢感が小さくなるはずである。すなわち、H-K効果の明るさの増幅度合いと光沢感には負の相関が現れる。

## 2.3 実験方法

### 2.3.1 被験者

本実験は20代男性7人に対して行われた。全被験者の視力または矯正視力は正常であり、かつ石原式色覚異常検査表により色覚が正常であることが確認されていた。

### 2.3.2 実験環境

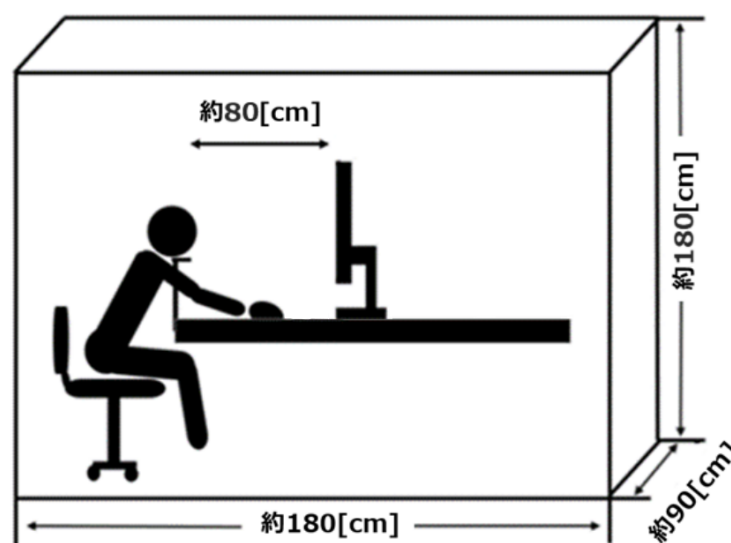


Fig. 2.1: 実験環境概略図

図???に実験環境の概略図を示す。暗幕で覆われた簡易的な暗室内に刺激呈示用液晶ディスプレイ (EIZO, 解像度 1920 ピクセル 1200 ピクセル, リフレッシュレート 60 Hz) を設置し実験を行った。また、刺激の輝度と色度を正確に投影するために分光反射輝度計 ( Cambridge Research Systems 社 SpectroCAL

) によりモニタの分光分布を、色彩輝度計 ( Cambridge Research Systems 社 ColorCAL2 ) によりモニタのガンマ特性を測定した。これにより、所望の CIE XYZ 三刺激値をモニタに呈示することが可能となった。

実験はすべて PC ( DELL 社 Vostro 13 5000, OS: Ubuntu 18.04.3 LTS ) で統制され、MathWorks MATLAB と Psychtoolbox3 を用いてプログラムを作成・実行することでディスプレイの刺激呈示と被験者応答を管理した。実験中、被験者の頭部はディスプレイから 80 cm の距離に顎台により固定され、両眼自然視でディスプレイを観察した。被験者はトラックボールマウスを使用して応答した。

### 2.3.3 実験刺激



Fig. 2.2: 1 試行に呈示される実験刺激の例

図 ??? に実験 1 で使用する刺激を示す。刺激は黒背景上の中心部分の縦 6.42 deg, 横 17.35 deg の範囲の左右に呈示される二枚のコンピュータグラフィックス画像であった。これらの画像はモニタ中央を挟んで対称な位置に呈示された。また、各画像はコンピュータグラフィックスソフトウェアを用いたレンダリングと、MATLAB 上での簡易的な画像処理を用いた着色の二つの工程を経て作られた。以下に、これらの工程の詳細を記す。



## レンダリング

実験に用いた刺激の元となる無彩色刺激は RenderToolbox4 によって、レンダラーを Mitsuba として作成された。この際の照明環境は CIE 標準光源 D65 であり、物体の分光反射特性は全波長にわたり同じ値であった。物体形状として、Stanford Dragon と Stanford Bunny [todo: 引用情報] の2種類を使用し、照明環境も含めた環境のジオメトリは Blender 2.79 により設定した。一方、表面反射特性は RenderToolbox4 と Mitsuba により設定し、その反射モデルとして Ward モデルを用いた。この際、拡散反射成分と鏡面反射成分の色度を別々に操作するため、これらの反射成分は独立にレンダリングした。このレンダリングにおけるパラメータを表 ??? に実験 1 で使用する刺激を示す。

TABLE 2.1: レンダリング時のパラメータ

|        | SpecularReflectance | DiffuseReflectance | Roughness |
|--------|---------------------|--------------------|-----------|
| 拡散反射成分 | 0                   | 0.1                | 0.2       |
| 鏡面反射成分 | 0.9                 | 0                  | 0.2       |

## 着色

レンダリングされた画像は上述したとおり D65 の色度を持つ画像であったが、その画像に対して色条件を設定するために色度を付与した。その方法は SD 着色と D 着色の2種類であった。SD 着色では、拡散反射成分と鏡面反射成分の両方に同じ色度を設定し、それらの CIE XYZ 値を加算して作成した。D 着色では、拡散反射成分にのみ着色を行い、XYZ 値を加算して作成した。この着色処理において、Mitsuba によってレンダリングされた画像の XYZ 三刺激値を  $u'v'Y$  色空間に変換し、 $u'v'$  色度図上で行われた。その色度は全部で9種類である。そのうち1種類は D65 の色度であり、これを白色点とする。その他の8種類の色度は、白色点を中心とし、 $u'v'$  色度図上の  $0^\circ$  から  $45^\circ$  間隔となる8方向にある色度であった。本論文では、これらの9色度をそれぞれ gray, red, orange, yellow, green, blue-green, cyan, blue, magenta と呼ぶことにする。

レンダリングされた画像 (以下 raw 画像) は高輝度域を含む画像であった。モニタが表示可能な色域は輝度によって異なり、特にモニタが表示できる最大・最小輝度付近における  $u'v'$  色度図の領域は非常に小さい。すなわち、この画像に対して着色処理を行った場合、鏡面反射成分に十分な彩度の色度を付与することができないため、SD 着色条件と D 着色条件を十分に差別化することができない。このため、線形トーンマッピングによって画像の最高輝度を下げた。

また、モニタが表示可能な色域は色相によっても異なる。レンダリングされた画像にモニタの色域外の色度を付与しないように、画像の輝度を対数尺度を用いて200段階に標準化し、そのそれぞれの輝度に対して9種類の色度の白色点から最大距離となる点を計測した。

#### 2.3.4 実験手続き

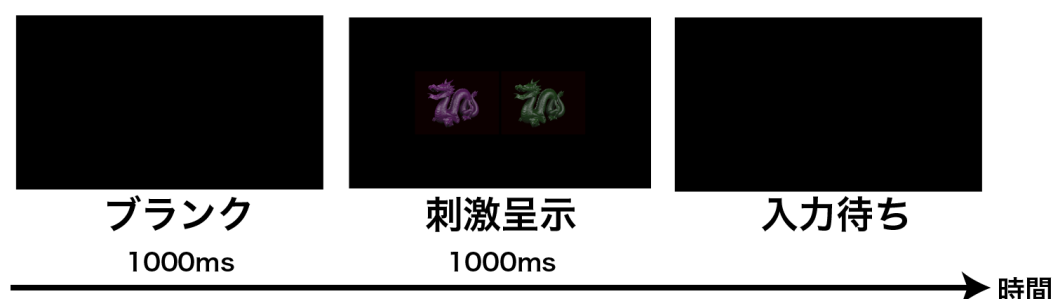


Fig. 2.3: 実験1の1試行の流れ

実験1はサーストンの一対比較法を用いて行われた。実験1の1試行の流れを図 ??? に示す。各試行はまず黒背景のみからなるブランク画面の1000msの呈示から始まる。その後、刺激対が1000msの間呈示され、さらに、色順応を避けるために黒背景のみからなる入力待ち画面に移行した。刺激対の呈示中または入力待ち画面で、被験者は右画像と左画像のうちどちらからより光沢感を強く知覚するかを、マウスの左クリックまたは右クリックにより応答した。このとき次の試行のブランク画面に移行した。

各セッションは2着色条件 物体形状2種類 色の組み合わせ36通り = 144試行からなり、各被験者は全体で4セッションの実験を行った。各セッションの144試行で使われる刺激対は全てランダムな順序で選ばれた。1セッションに要する時間はおよそ8分であり、2セッション目と3セッション目の間に一度だけ休憩をとった。

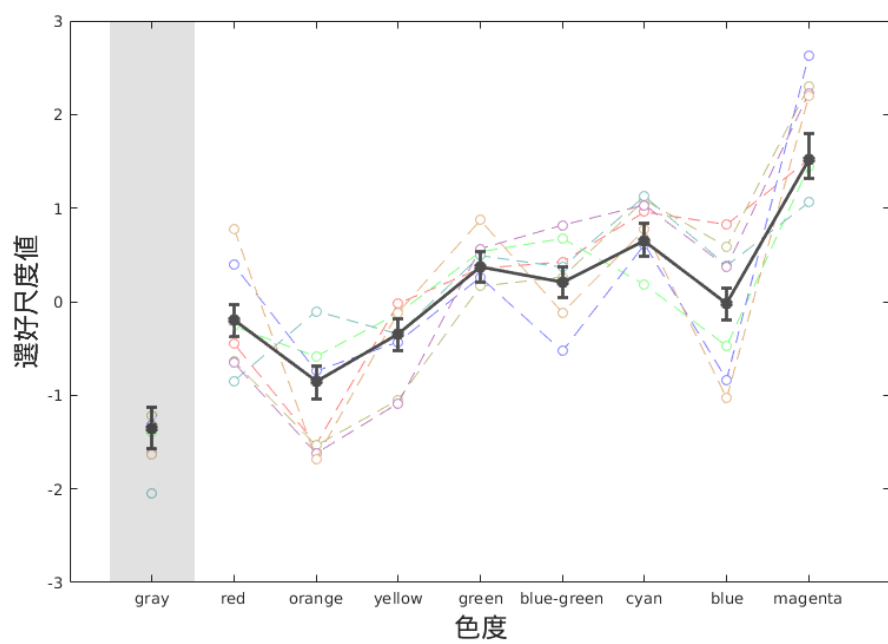


Fig. 2.4: Dragon 形状のSD 条件における選好尺度値

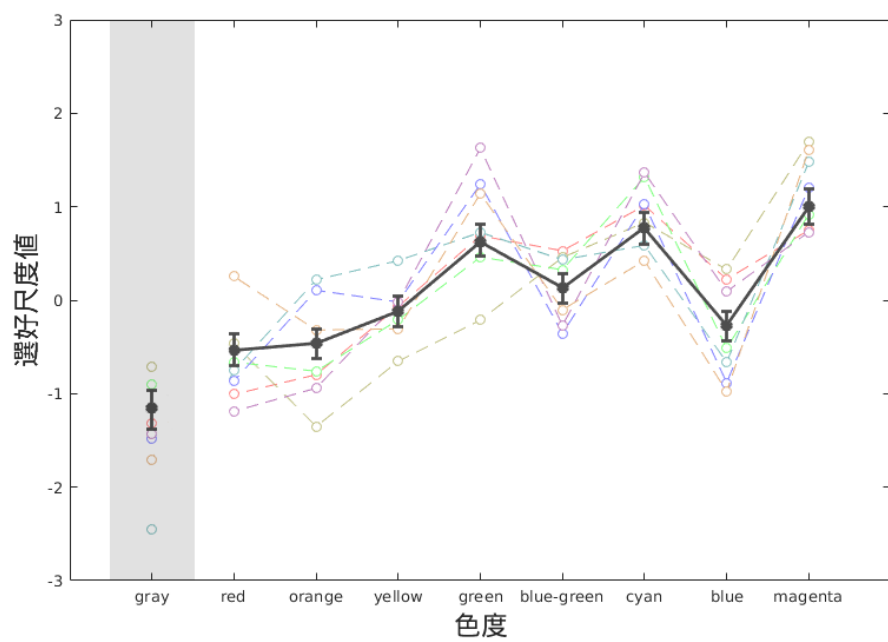


Fig. 2.5: Bunny 形状のSD 条件における選好尺度値

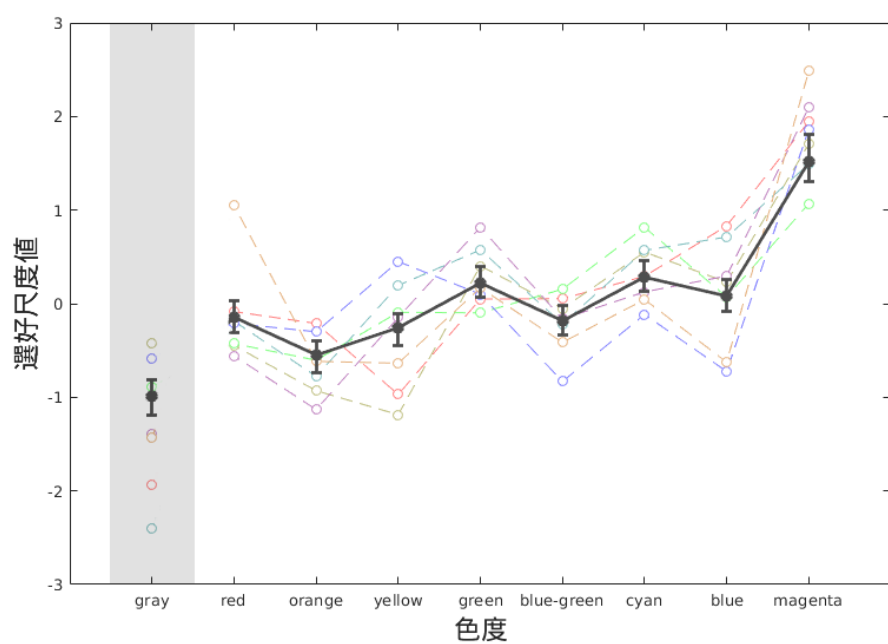


Fig. 2.6: Dragon 形状の D 条件における選好尺度値

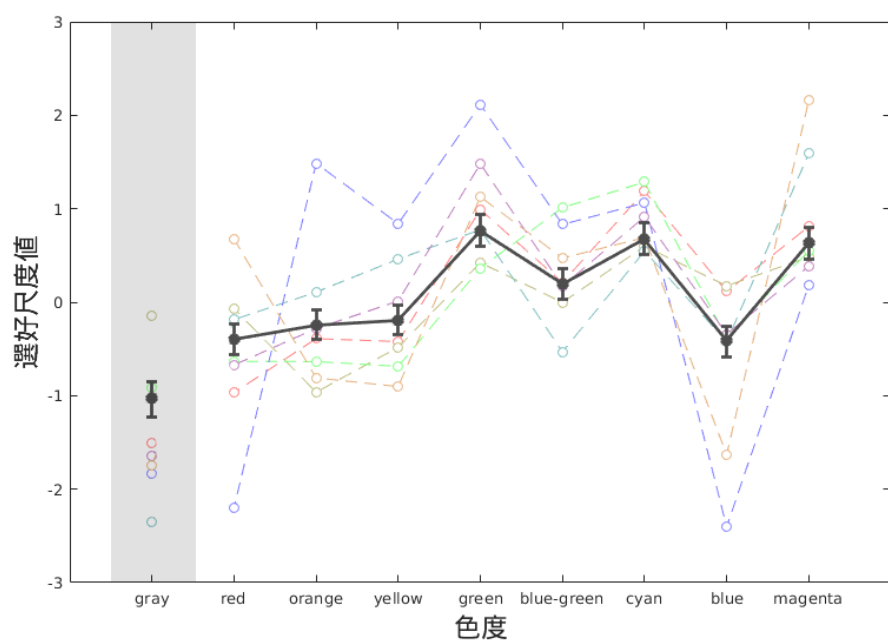


Fig. 2.7: Bunny 形状の D 条件における選好尺度値

## 2.4 実験結果

### 2.4.1 解析方法

### 2.4.2 考察

物体形状や着色条件に関わらず、すべての条件において色度により光沢感が異なることがわかる。特に Bunny:D 着色条件を除いて magenta の光沢感が極めて高く、次いで green,cyan の光沢感が高いという結果となった。Dragon 形状における SD 条件, Bunny 形状の SD 着色, Dragon:D 着色の 3 条件で似た傾向が見られたが、Bunny:D 着色条件では blue と magenta の光沢感が相対的に低い値であった。

仮説通りであれば、D 着色条件において red や magenta の色度における光沢感 は他の色度に比べて低いはずであるが、Dragon,Bunny の両方でそのような傾向は見られない。このため、光沢感が拡散反射と鏡面反射の知覚的な明るさのコントラストによって主に決まっているという訳ではないと言える。

ここで、SD 着色条件と D 着色条件で傾向に大きな違いが見られないこと、magenta の光沢感が極端に大きいことに着目する。明るさのコントラストではなく、刺激全体を通して感じられる明るさが光沢感に寄与しているのではないかと考え、次の実験 2 を行った。

### 2.4.3 選好尺度値

## 第3章

### 実験2

#### 3.1 目的

実験2では、実験1で使用した刺激を元にした単色パッチを用いて明るさを定量化する。実験1の光沢感の色度による傾向と明るさの色度による傾向を比較することで、光沢感と明るさの相関を明らかにする。

#### 3.2 実験方法

##### 3.2.1 実験環境、被験者

実験2で用いた装置と参加した被験者は、いずれも実験1と同一であった。

##### 3.2.2 実験刺激

図に実験2で使用する刺激と、参照刺激に使われた色を示す。参照刺激として使われた18種類の色度は、実験1で用いたStanford DragonのSD着色条件、D着色条件のそれぞれの刺激の平均色(以下SD平均,D平均とする)である。

##### 3.2.3 実験手続き

実験2では調整法によりカラーパッチの知覚的な明るさを計測する。実験2の1試行の流れを図に示す。各試行では、はじめに黒背景のみからなるブランク画面が1000 msの間呈示された。次に参照刺激であるカラーパッチとテスト刺激である無彩色パッチからなる刺激対が呈示された。被験者はトラックボールを左右に回すことにより、無彩色パッチの輝度を調節し、カラーパッチと同じ明るさに知覚されるようになるまで操作した。同じ明るさと判断した場合はトラックボールマウスの右クリックを押すことで次の試行のブランク画面へ移行した。この時、テスト刺激の輝度が記録された。カラーパッチと無彩色パッチ

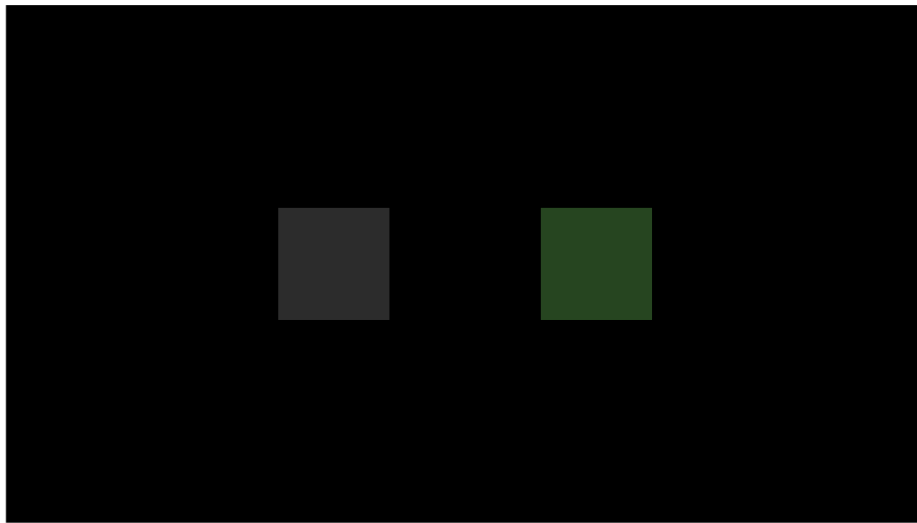


Fig. 3.1: 1 試行に呈示される実験刺激の例



Fig. 3.2: 参照刺激として使われた色

の左右位置は試行ごとにランダムに決定された。各セッションは 2 着色条件色度 9 通り = 18 試行からなり、各被験者は全体で 5 セッションの実験を行った。各セッションの 18 試行で使われる参照刺激は全てランダムな順序で選ばれた。

### 3.3 実験結果

SD 平均、D 平均ともに同様の傾向が得られた。この結果と実験 1 の結果から、光沢感と明るさの相関を調べる。

尺度を揃えるため、実験 1 と実験 2 のデータの両方に正規化を行い、条件ごとに散布図にプロットした。各点の色は実験で使われた 9 種類の色度からなり、ある点の色の色度条件について横軸は明るさを、縦軸は光沢感を表している。また表は各物体形状・着色条件における相関係数を表す。

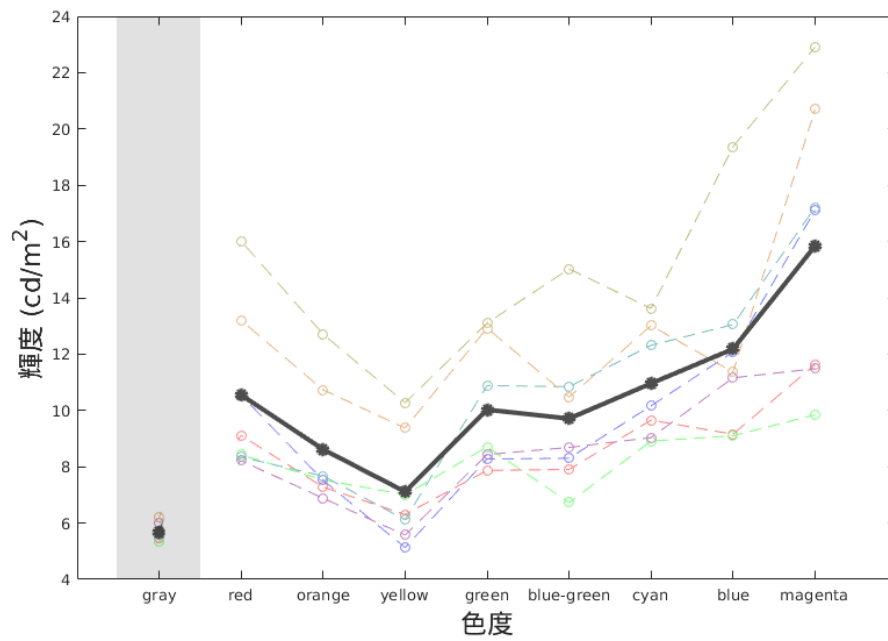


Fig. 3.3: SD 平均条件におけるテスト刺激の輝度

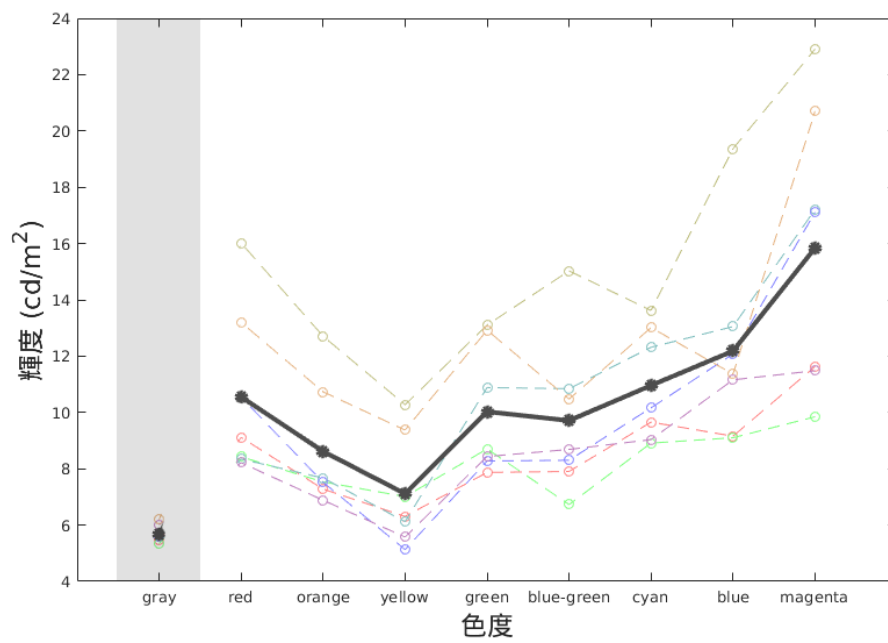


Fig. 3.4: D 平均条件におけるテスト刺激の輝度



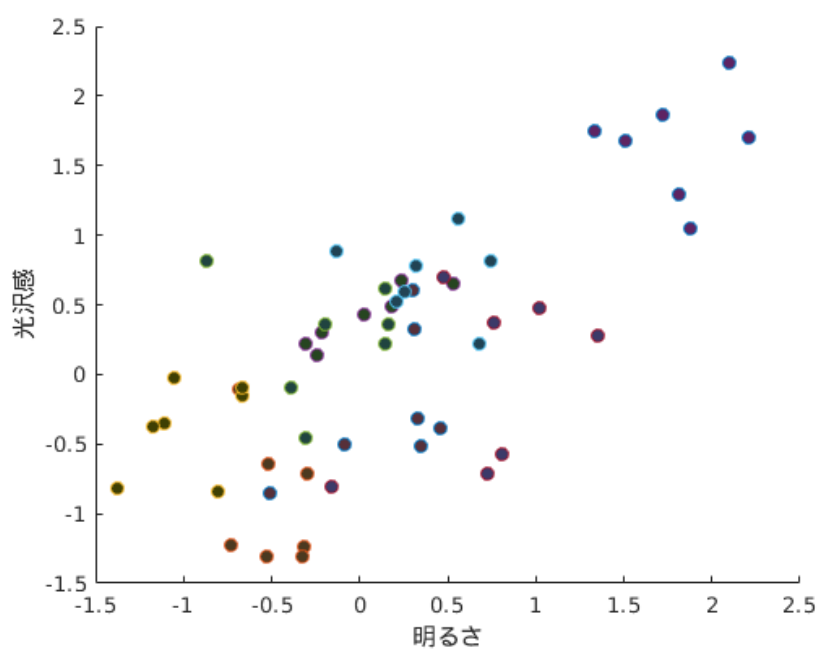


Fig. 3.5: Dragon:SD

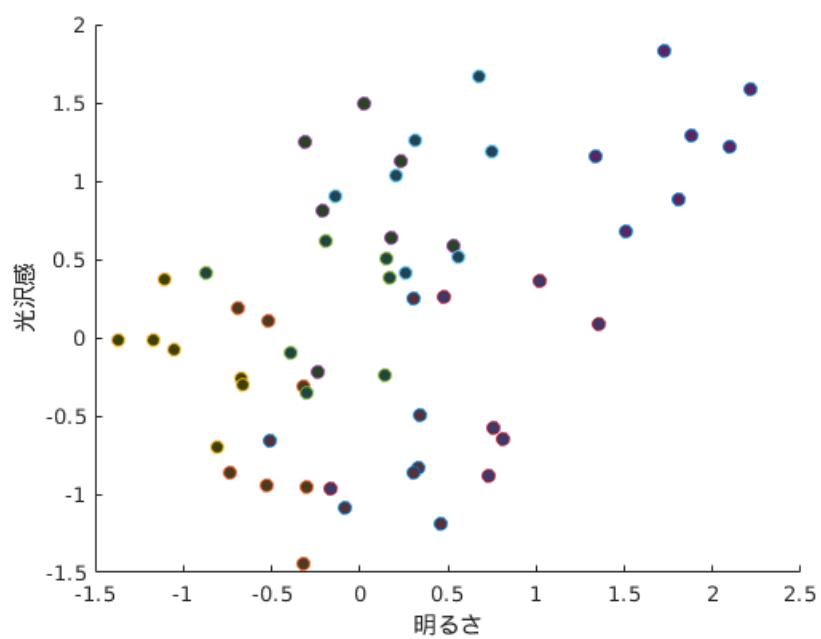
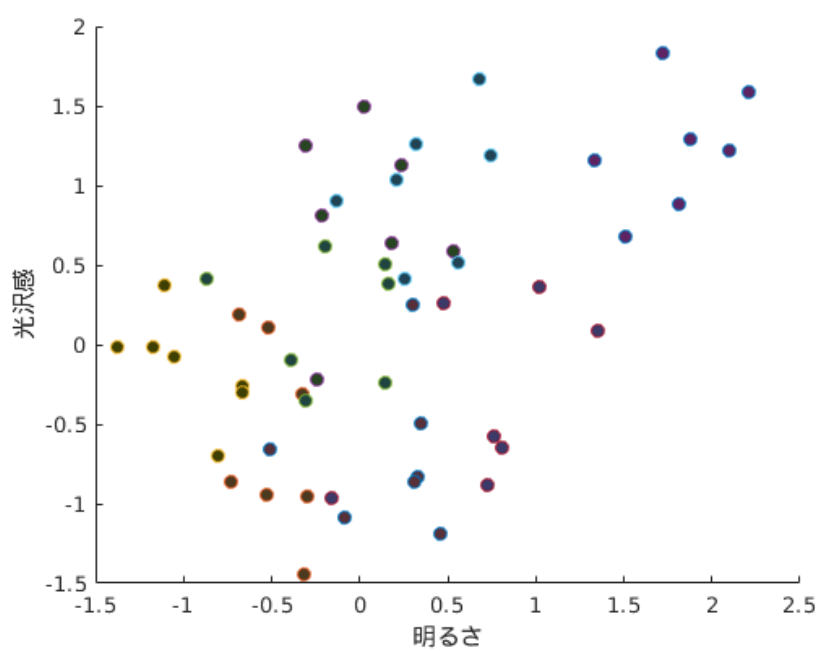
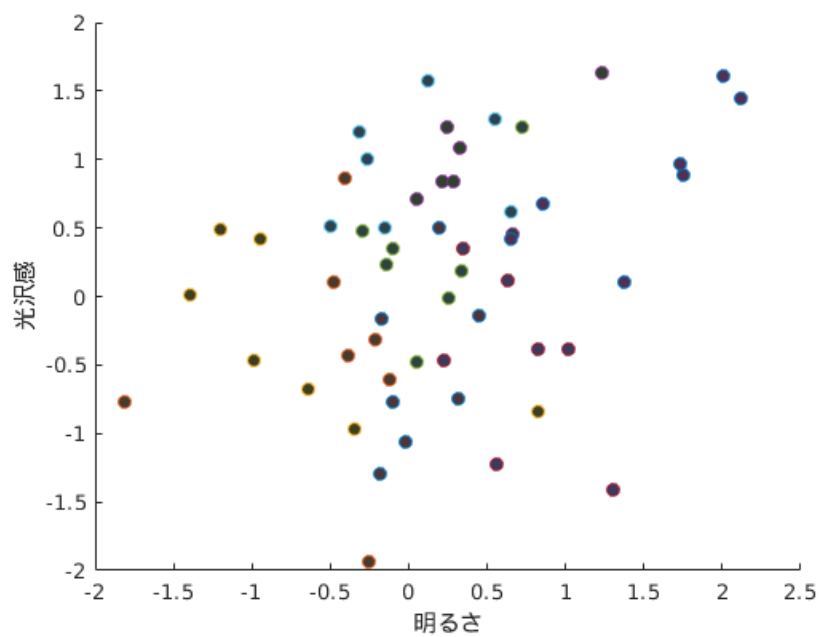


Fig. 3.6: Bunny:SD

Dragon:SD、Dragon:Dにおいて比較的強い正の相関が見られたが、これに比



**Fig. 3.7:** Dragon:D



**Fig. 3.8:** Bunny:D

べて Bunny:SD, Bunny:D の相関係数は小さい値を示した。この結果は、H-K 効

TABLE 3.1: 各条件の相関係数

|        | SD     | D      |
|--------|--------|--------|
| Dragon | 0.8828 | 0.8290 |
| Bunny  | 0.6490 | 0.5184 |

果がもたらす知覚的な明るさは光沢感に寄与する要因の一つであるが、他の要因も寄与している可能性を示唆する。

## 第4章

### 結論

結論はかくかくしかじか．結論はかくかくしかじか．結論はかくかくしかじか．結論はかくかくしかじか．結論はかくかくしかじか．結論はかくかくしかじか．

残された課題はかくかくしかじか．残された課題はかくかくしかじか．残された課題はかくかくしかじか．残された課題はかくかくしかじか．

## 謝辭

## 参考文献

- [1] 齋藤 正彦：線型代数入門，東京大学出版会，1966
- [2] 高木貞治：初等整数論講義(第2版)，共立出版，1988(昭和53)
- [3] D.E. Knuth: *The Art of Computer Programming*, 2nd Ed., vol.1 Fundamental Algorithm, Addison-Wesley, 1973
- [4] J.M. Wozencraft, I.M. Jacobs, *Princeples of Communication Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1965
- [5] J.G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 1995 (邦訳：デジタルコミュニケーション，科学技術出版社，1999)
- [6] A. Hocquenghem, “Codes correcteurs d’erreures,” *Chiffres*, vol.2, pp.147–156, 1959
- [7] R.C. Bose and D.K. Ray-Chaudhuri, “On a Class of Error Correcting Binary Group Codes,” *Information and Control*, vol.3, pp.68–79, 1960
- [8] G. L. Feng and T. R. N. Rao, “Decoding Algebraic-Geometric Codes up to the Designed Minimum Distance,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.IT-39, pp.37–45, 1993
- [9] 真面目 楽太郎, “楽に卒業する方法について,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J101-Z, no.13, pp.5398–6421, 2022