

令和 6 年 5 月 6 日現在

機関番号：32613  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2017～2023  
課題番号：17K04503  
研究課題名（和文）実環境における物体色知覚および照明光推定機構の心理物理実験と分光計測による解明

研究課題名（英文）Investigation of object color perception and illumination light estimation mechanisms in real environments using psychophysical experiments and spectroscopic measurements

研究代表者  
福田 一帆（Fukuda, Kazuho）  
工学院大学・情報学部（情報工学部）・准教授

研究者番号：50572905  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、分光計測と心理物理実験により、自然光のような不均一な照明光を簡便に測定して照明シミュレーション画像を作成する手法を構築すること、不均一な照明環境における物体の色や明るさの知覚および照明光推定メカニズムを明らかにすることを目的とした。成果として、ハイパースペクトルデータを用いた分光計測により、不均一照明の近似的な計測方法および不均一照明のシミュレーション画像作成方法を構築、実証した。また、作成した不均一照明シミュレーション画像、または被写体の物質感をコントロールした画像を用いた心理物理実験により、物体の色や明るさの知覚にそのシーンの物質感や不均一な照明環境が関係することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
物体色の知覚メカニズムに関する研究は種々あるが、不均一な照明分布の影響、観察対象やその周囲の物質感の影響などの解明はこれまで限定的であり、本研究は実験室環境と実環境の研究成果の関係性を考察するために意義がある。また、実環境を対象とした色覚研究においては、ハイパースペクトルデータを利用した照明変化のシミュレーション画像を作成して実験刺激とする方法がしばしば用いられるが、従来法では一様照明を仮定してシミュレーション画像を作成している。このような背景に対して、本研究の成果は不均一照明下の自然画像の取り扱いを容易にして色覚研究の進展に寄与することが期待できる他、光学分野の計測手法としても意義がある。

研究成果の概要（英文）：The objectives of this study were to construct a method for measuring non-uniform illuminant and creating simulated illumination images by using spectral measurements, and to clarify the perception of object color and lightness under non-uniform illuminant environments and the mechanism of estimating illumination in the visual system by using psychophysical experiments. This research project established a method for approximate spectral measurement of non-uniform illumination in a scene using hyperspectral data and a method for creating simulation images of the scene under arbitrary light sources. In addition, psychophysical experiments using the created simulated images of non-uniform illumination or images in which the material impression of the subject was controlled showed that the perception of the color and lightness of objects is related to the materiality of the scene and the non-uniform illuminant environment.

研究分野：感覚知覚，色覚

キーワード：色覚 照明光 分光計測 ハイパースペクトルデータ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ヒトが知覚する物体表面の色は物体による反射光の物理量からは特定できない。例えば、白い紙は日中の白色光の下と夕方の赤みのある光の下とは全く異なる反射光を示すが、ヒトは同様に白色の紙と知覚する。これは人間が照明光の影響を差し引いて物体色を知覚することを意味するが、そのメカニズムは未だ十分に解明されていない。ヒトによる物体色知覚メカニズムに関する研究は種々あるが、Golz & MacLeod (2002) は物体表面色の知覚がシーンの単純な画像統計量(平均色度と色度輝度相関)によって変化するという重要な結果を心理物理実験により示している。本研究の代表者は、MacLeodらと共に、彼らの成果を発展させて、物体表面色が取りうる最大輝度分布と照明光の関係の物理特性にもとづき「視覚系による照明光推定」を計算モデルに表し、幾何学図形を実験刺激として用いた心理実験によりその妥当性を確かめた(Uchikawa, Fukuda, et al. 2012)。さらに、計測実験により実環境に存在する物体色の最大輝度分布と理論的な物体色の最大輝度分布の乖離を示したことで、心理物理実験により対象やその周囲の物体感(物質感)の程度による知覚的な物体色最大輝度の変化を示したことから、観察シーンの実物感の影響の検討も重要な課題であることが示唆された。

実環境を対象とした色覚研究においては、二次元画像の各点における分光情報を記録可能なハイパースペクトルデータを用いることにより、自然風景の分光情報を計測し、そこからシーン各天における分光反射率を求めて、照明変化を模擬した実験刺激を近似的に作成する方法が用いられる(Foster, 2019)。しかし、従来法では一般的にシーン全体が均一照明と仮定して分光反射率を求めており、物体の三次元的な位置や形状にもとづく照明の不均一性の記録、およびそれを反映した実験刺激の作成はできず、自然画像を用いた色覚研究における課題とされてきた。

### 2. 研究の目的

本研究では、物体色の見えと照明光の関係について、光学的測定と心理物理的手法により色や明るさの恒常性および視覚系における照明光推定メカニズムを明らかにすることを目的とした。

実環境に対する光学的測定では、シーンの分光情報を記録したハイパースペクトルデータを活用し、被写体の三次元形状にもとづく不均一な照明の計測方法を確立することを目的とした。また、その不均一照明の計測結果を利用して、照明変化シミュレーション画像を作成する方法を構築し、実際に心理物理実験に利用可能なシミュレーション画像を作成することを目的とした。

心理物理的手法では、自然画像やシーンの物質感を制御した実験刺激に対する心理物理実験を実施することにより、実環境における照明光の分布を視覚化すること、色や明るさの見えに対するシーンの実物感、物質感の影響を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

- (1) 実環境における不均一照明の分光計測、および照明シミュレーション画像の作成をおこなう方法として、研究当初はハイパースペクトルカメラを用いて測定した分光情報と画像解析ソフトによるシーンの三次元情報を組み合わせて、独自の解析プログラムを作成して分光反射率画像データを作成する計画であった。しかし、研究期間中に再検討を重ね、より簡便な方法を考案して検証をおこなった。

本研究では、ハイパースペクトルカメラを用いて同一シーンに対して異なる照明条件下で複数回の計測をおこなうことにより、不均一照明の分光情報を近似的に記録する分光計測方法を構築して、実際に計測を実施して検証した。この計測方法では、太陽光のように陰影を生じる不均一照明(A)と、天空光のように均一性の高い照明(B)の混合光に照らされたシーンを計測対象とする。計測時には、照明AとBの混合光に照らされた照明条件(A+B)と、照明Aを遮り照明Bのみに照らされた照明条件(B)、の二つの照明条件下でハイパースペクトルデータの記録をおこない、さらに分光照度計により照明Bのスペクトルデータを記録した。次に、これらのデータに対して演算を行い、被写体の分光反射率マップ、照明Aの分光スペクトルマップ、それぞれのハイパースペクトルデータを算出した。また、分離した不均一照明Aと一様照明Bについて、それぞれを任意のスペクトルの光源に置き換えて被写体の分光反射率マップと掛け合わせることで、シミュレーション画像を作成した。検証実験は実験室で実施し、幾何学立体石膏像をスチロール板上に配置して被写体とし、カメラ左右に配置したLED人工太陽照明灯を均一性の高い照明、カメラ右上方に配置した人工太陽照明灯を不均一照明として、ハイパースペクトルカメラと分光照度計により計測した。

- (2) 色や明るさの見えに関して、シーンの照明分布、シーンの実物感や物質感の影響を明らかにするための心理物理実験を実施した。

本研究において作成した不均一照明シミュレーション画像を用いて、シーンの不均一照明と一様照明の色変化がシーンの環境推定およびシーンの印象に与える効果について検討した。不均一照明と一様照明それぞれ暖色照明 4000K、白色照明 6500K、寒色照明 20000K の組合せからなる9種類の照明条件の画像を1枚ずつ被験者に呈示し、被験者はシーンの時間帯・天気・季節を与えられた選択肢から回答し、さらに印象評価を実施した。

また、実環境における物体色知覚に関して、自然風景画像を用いて被写体の認識性を操作したときの色や明度の知覚を心理物理実験により測定した。この実験では、対象物の素材や質感の影響を検討するために、オリジナルの画像と同等の素材感を維持したまま色数を限定した「物体画像」と、それと全く同一の色を幾何学形状に置き換えて配置した「無意味画像」の間で画像中のターゲット色が発光して見えない上限の輝度(物体色上限輝度)を比較した。

#### 4. 研究成果

- (1) 混合照明下における分光計測および照明シミュレーション画像作成の検証実験の結果、提案手法により被写体の分光反射率マップとシーンの不均一照明の分光スペクトルマップの各ハイパースペクトルイメージを近似的に記録でき、二種類の照明光スペクトル各々を任意のスペクトルに置き換えた照明シミュレーション画像を作成できることが確かめられた。また、計測時の一様照明Bの不均一さが分光反射率マップの誤差要因となることも確認できた。

図1は(a)混合光の環境下で計測したハイパースペクトルデータとその輝度色度分布、(b)不均一照明をマゼンタ、均一照明を緑の光に置換したシミュレーション画像とその輝度色度分布をそれぞれ表す<sup>1)</sup>。(a)は計測シーンの座標により照明光の色度が異なる様子を計測できていることを意味する。これは被写体の三次元形状や配置により二種類の照明の混合比が異なることに加えて、物体の二次反射などによる影響も記録されていると考えられる。(b)には陰影や投射影による照明強度の高低に応じて画像の色度がマゼンタから緑に変化する様子が表れており、妥当な照明シミュレーション画像が作成できていることを意味する。

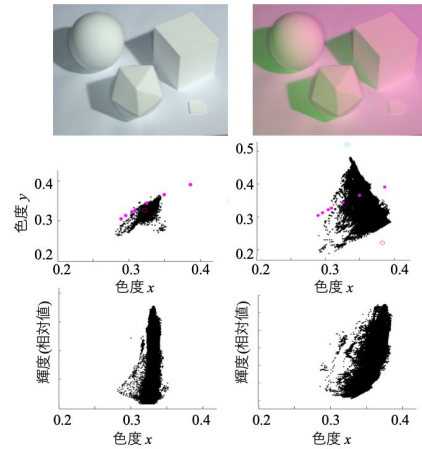


図1.分光計測結果とシミュレーション画像

- (2) 本研究の提案手法により作成した照明シミュレーション画像を用いて、シーンの不均一照明と一様照明の色変化がシーンの環境推定およびシーンの印象に与える効果について検討した心理物理実験の結果、二種類の照明光の組み合わせにより天気・時間・季節いずれの環境推定においても有意な回答の偏りが確認でき、その回答傾向は屋外において測定した自然光の照明環境<sup>2)</sup>と整合することが確かめられた。また、印象については、二種類の光源が同色の条件よりも不均一照明と均一照明の光源色が異なる条件においてポジティブな評価が高い傾向が示された。これらの結果は、シミュレーション画像における照明光の空間分布の再現性が知覚的に妥当な範囲であること、照明の空間分布が知覚や感性に寄与していることを意味する。

物体の色や明度の知覚における対象物の素材や質感の影響を心理物理実験により測定した実験からは、素材感の無い無意味画像を用いた条件の方が、被写体を認識できる物体画像を用いた条件よりも、知覚的な物体色上限輝度が高い値となる傾向が表れた。図2は無意味画像と物体画像の一例とその画像に対する知覚的な物体色上限輝度を表す<sup>3)</sup>。この結果は、実環境に存在する物体色の最大輝度分布が理論的な物体色の最大輝度分布よりも低く乖離していることに整合し、物体の色や明るさの知覚に素材感が影響することを示唆する。ただし、被写体の種類、実験対象とする色の色度、周辺画像の色の偏りなども影響する傾向が表れていることは今後の課題である。他に、放射上の輝度グラデーションにより明るさ眩しさを知覚するグレア錯視の図形を複数個配置することにより、輝度グラデーションの構造的な解釈の変化をとまなう知覚交替が生起する現象を発見した。この現象について、知覚交替の頻度、知覚的な明るさの主観評価、刺激の配色の影響などを検討するための心理物理実験を実施し、網膜像が一定であっても構造的解釈の変化による対象の物質感の変化と明るさ知覚の間に関係があることが示された<sup>4)</sup>。

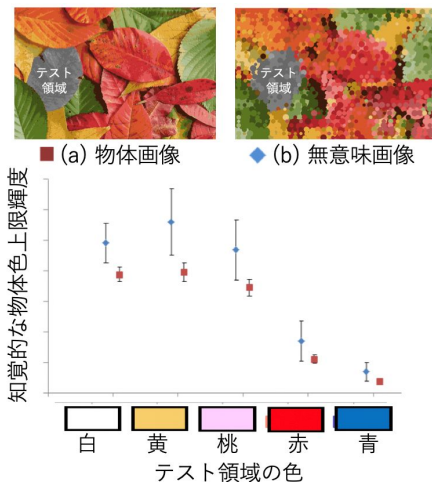


図2.画像の構成要素による知覚的な輝度

#### 引用文献

- 1) 福田, 山縣 (2024). 不均一照明の分光情報の記録と照明シミュレーション画像の作成, 日本視覚学会 2024 冬季大会
- 2) Morimoto, Zhang, Fukuda, Uchikawa (2022). Spectral measurement of daylight and surface properties of natural objects in Japan, *Optics Express*, 30 (3), 3183-3204
- 3) Fukuda, Hara (2019). Effect of Object Recognition on the Object-color Appearance Mode Limitation, *ACA 2019 Nagoya*
- 4) Yamagata, Fukuda (2023). The switching glare illusion: Appearance and disappearance of glare effect due to figure-ground reversal, *i-Perception*, 14(3), 1-6

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yamagata Risa, Fukuda Kazuho	4. 巻 14
2. 論文標題 The switching glare illusion: Appearance and disappearance of glare effect due to figure-ground reversal	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 i-Perception	6. 最初と最後の頁 (3) 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/20416695231179627	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takuma Morimoto, Cong Zhang, Kazuho Fukuda, Keiji Uchikawa	4. 巻 30 (3)
2. 論文標題 Spectral measurement of daylights and surface properties of natural objects in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 3183, 3204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.441063	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Takuma Morimoto, Ai Numata, Kazuho Fukuda, Keiji Uchikawa	4. 巻 21 (13)
2. 論文標題 Luminosity thresholds of colored surfaces are determined by their upper-limit luminances empirically internalized in the visual system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Vision	6. 最初と最後の頁 7-1, 7-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1167/jov.21.13.3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Takuma Morimoto, Kazuho Fukuda, Keiji Uchikawa	4. 巻 178
2. 論文標題 Explaining #theShoe based on the optimal color hypothesis: The role of chromaticity vs. luminance distribution in an ambiguous image	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Vision Research	6. 最初と最後の頁 117-123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.visres.2020.10.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Takuma Morimoto, Takahiro Kusuyama, Kazuho Fukuda, Keiji Uchikawa	4. 巻 21 (7)
2. 論文標題 Human color constancy based on the geometry of color distributions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Vision	6. 最初と最後の頁 1-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1167/jov.21.3.7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 福田一帆, 山縣里紗
2. 発表標題 不均一照明の分光情報の記録と照明シミュレーション画像の作成
3. 学会等名 日本視覚学会2024年冬季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山縣里紗, 福田一帆
2. 発表標題 明滅グレア錯視の構造的解釈が明るさ知覚と瞳孔反応に与える影響
3. 学会等名 日本視覚学会2024年冬季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Risa Yamagata, Kazuho Fukuda
2. 発表標題 Perceptual Alternation in Colored Switching Glare Illusion
3. 学会等名 The 7th ASIA Color Association Conference (ACA 2022 Taipei) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuma Morimoto, Kazuho Fukuda, Keiji Uchikawa
2. 発表標題 Spectral measurements of reflectance and transmittance of natural objects and daylight in Japan
3. 学会等名 European Conference of Visual Perception (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 機械学習による色恒常性の成立に必要な学習条件
2. 発表標題 森本拓馬, 鈴木雅洋, 鯉田孝和, 福田一帆, 内川恵二
3. 学会等名 映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuho Fukuda, Takuma Morimoto, Ben Kusano, Keiji Uchikawa
2. 発表標題 Illuminants estimated by human observers for natural objects under daylights compared with those predicted by the optimal color hypothesis
3. 学会等名 OSA Fall Vision Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuho Fukuda, Kotoe Hara
2. 発表標題 Effect of Object Recognition on the Object-color Appearance Mode Limitation
3. 学会等名 The 5th Asia Color Association Conference (ACA2019 Nagoya) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiji Uchikawa, Kazuho Fukuda, Takuma Morimoto
2. 発表標題 Predicting the luminosity thresholds for chromatic stimuli by the optimal color hypothesis
3. 学会等名 OSA Fall Vision Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keiji Uchikawa, Kazuho Fukuda
2. 発表標題 Illuminant estimation by the optimal color hypothesis for natural objects and daylights
3. 学会等名 The 24th Symposium of the International Colour Vision Society (ICVS 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 神尾美幸, 福田一帆
2. 発表標題 実物体の明度の恒常性における物体の色や質感の違いによる影響
3. 学会等名 映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 内川恵二, 森本拓馬, 松本知久, 福田一帆
2. 発表標題 オプティマルカラー仮説による照明光推定に基づく"#TheDress"の見えの予測
3. 学会等名 第 19 回 日本感性工学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福田一帆, 内川恵二
2. 発表標題 自然環境の分光測定結果による照明光推定オブティマルカラーモデルの検証
3. 学会等名 映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 吉澤達也, 氏家弘裕, 溝上陽子, 福田一帆, 小島治幸, 佐藤雅之, 蘆田宏, 栗木一郎, 上田和夫, 松永理恵, 岡嶋克典, 妹尾武治, 笹山琴由, 永井岳大, 蒲池みゆき	4. 発行年 2023年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 208
3. 書名 感覚知覚の心理学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関