The 4th International Symposium 2023

by the International Research Center

for Color Science and Art

[PROCEEDINGS

日時 Date and Time

2023年3月4日(土) 10:00 - 18:20, (懇親会 17:20 - 18:20) 10:00 - 18:20 (Social gathering 17:20~18:20), Saturday, March 4, 2023

テーマ Theme

カラーサイエンス&アートの魅力 Fascination of Color Science and Art

基調講演者 Keynote Speakers

・アンナ・フランクリン氏(サセックス大学教授) Anna Franklin (Prof. of the Sussex Colour Group & Baby Lab, University of Sussex)

・アルムート・ケルバー氏(ルンド大学教授)

Almut Kelber (Prof. of the Department of Biology and the member of the Lund Vision Group, Lund University)

・北岡 明佳氏(立命館大学教授)
KITAOKA Akiyoshi (Prof. of the Psychology, Ritsumeikan
University)

・栗木 一郎氏(埼玉大学教授) KURIKI Ichiro (Prof. of the Graduate School of Science and Engineering, Saitama University)

会場 Venue

東京工芸大学中野キャンパス6号館1階6101教室

東京都中野区弥生町 1-10

Nakano Campus of Tokyo Polytechnic University

#6101, No.6 Building 1F

1-10 Yayoicho, Nakano City, Tokyo



展示 Exhibition

当日は、色の国際科学芸術研究センターの研究及びアート&テクノロジーマネジメント 講座の成果をポスター展示形式でご紹介します。

Projects from research findings of the International Research Center for Color Science and Art, and the Art & Technology management course will also be on display on the day of the event.

展示会場:東京工芸大学中野キャンパス 6 号館 B1 展示室

Venue: Exhibition Room, No. 6 Building B1, Nakano Campus of the Tokyo Polytechnic University

懇親会 Social Gathering

今回のシンポジウムでは、発表者や参加者が意見交換できる場として懇親会を予定しています。

At this symposium, we will hold a social gathering where presenters and participants can exchange opinions.

会場:東京工芸大学中野キャンパス 6 号館 B1 展示室 時間:17:20 - 18:20 参加費:無料

Venue: Exhibition Room, No.6 Building B1 Time:17:20 – 18:20 Fee: Free

タイムテーブル Timetable

Г

10.00 10.05	問合性物 Opening Address
10:00~10:05	開云疾拶 Opening Address
	古野 弘草 字長, IPU
	YOSHINO Hiroaki, President of TPU
	基調講演 1 Keynote Speech 1
10:05~10:55	
	空間的な色の混合と色の錯覚
	Spatial Color Mixing and Color Illusions
	北岡 明佳(立命館大学 教授)
	KITAOKA Akiyoshi, Prof. of the Psychology, Ritsumeikan
	University
10:55~11:05	休憩 Break
11.05~11.20	
11.05 11.20	Poppor を使用したテレイグジスタンフロボットの分に上る信動実現の開発
	Pepper を使用した) レイノノスノノスロボクトのElec る 情報衣域の開発
	Televistence Debet using Deper
	OGAL YUTA, KIMATA YUSUKE, NAKANO TAKUMI, and SHIN DUK
	事業研究者講演 2 Oral Presentation 2
11:20~11:35	
	顔色解析による健康可視化とスマートミラーへの実装
	Visualizing Health Status using Face Color Analysis and its
	Application to Smart Mirrors
	森山 剛, 高橋 伸弥(福岡大学), 小野 博(中央大学), 綱鳥 宣浩(株式会社ティ
	ービーアイ)
	MORIYAMA Tsuvoshi, TAKAHASHI Shinya (Fukuoka Univ.) ONO
	Hiroshi (Chuo Univ.) TSUNASHIMA Nobubiro (TR-eve Ltd.)
	事業研究考護演 3 Oral Procentation 3
11.25	事未则九百時供 J UIALFIESEIIIALIUII J
11:35~11:50	
	Muscle Activity Visualization with Color using Muscle Synergy
	Information

	神原 裕行, 辛 徳, 姜 有宣
	KAMBARA Hiroyuki, SHIN Duk, KANG Yousun
	事業研究者講演 4 Oral Presentation 4
11:50~12:05	
	フォトグラメトリーによって作成した3D モデリングとインデックスマッピングを
	含むフルカラー3D 造形
	3D Modeling Created by Photogrammetry and Full Color 3D
	Modeling Including Index Mapping
	UCHIDA Takayuki
	事業研究者講演 5 Oral Presentation 5
12:05~12:20	
	外観テサインと調相する透明アンテナ Transport Antonnoo Matching with the Surrounding
	Transparent Antennas Matching with the Surrounding
	Appearance and Design
	KOSHI II Fukuro YAMADA Katsumi YASUDA Yoji
	UCHIDA Takavuki
	事業研究者講演 6 Oral Presentation 6
12:20~ 12 :35	
	再帰的矩形分割を使用した抽象画
	Abstract Pictures Using Recursive Division of Rectangle
	久原 泰雄
	KUHARA Yasuo
12:35~13:20	休憩 Break
12 20 14 10	
13:20~14:10	トの免知労の脳中シューブノ
	へい巴和見い脳内入り二人ム Cortical Mechanisms of Color Perception in Humans
	東大 一部 埼玉大学教授
	KURIKI Ichiro, Prof. of the Graduate School of Science and
	Engineering, Saitama University

	事業研究者講演 7 Oral Presentation 7
14:10~14:25	
	スーパールミネッセントダイオードを用いた高精度干渉顕微鏡の開発
	Development of a High Precision Interference Microscope
	using SLD
	陳軍,安田洋司,豐田光紀
	CHEN Jun, YASUDA Yoji, TOYODA Mitsunori
14.25 - 14.40	事業研究有講演 8 Oral Presentation 8
14:25~14:40	信米を考虑した辞面反射のリマルタイムレイトレーシング
	備して考慮した。現面反射のウチルタイムレイトレーシンク Peoletime Pay Tracing of Specular Peflection with
	Real-time Ray Tracing of Specular Reflection with
	今給黎 隆
	事業研究者講演 9 Oral Presentation 9
14:40~14:55	
	二つの有機色素を用いた金属様光沢の混色
	Mixing Metallic Luster with Two Organic Dyes
	山田 勝実, 矢島 仁
	YAMADA Katsumi, YAJIMA Hitoshi
	事業研究者講演 10 Oral Presentation 10
14:55~15:10	
	黒鉛層間化合物の色標本の作製
	Preparation of Color Samples of Graphite Intercalation
	Compounds
	松平 生省, 八嗎 止入, 山田 勝夫, 行台 時男, 頁方 具足
	MATSUMUTU RIKA, USHIMA MASALO, TAMADA KALSUMI,
	TORITA TORIO, SANERATA Masaoini
15:10~15:20	休憩 Break
	基調講演 3 Keynote Speech 3
15:20~16:10	
	動物の色覚の限界
	Limits of Animal Colour Vision
	アルムート・ケルバー(ルンド大学教授)

	Almut Kelber (Prof. of the Department of Biology and the member of the Lund Vision Group, Lund University)			
16:10~17:00	基調講演 4 Keynote Speech 4			
	赤ちゃんは色やアートやデザインについて何を教えてくれるでしょうか?? What can Babies tell us about Color, Art and Design? アンナ・フランクリン(サセックス大学教授) Anna Franklin (Prof. of the the Sussex Colour Group & Baby Lab, University of Sussex)			
17:00~17:10	閉会挨拶 Closing Address			
	野口 靖, 色の国際科学芸術研究センター長, TPU NOCUCHI Vasushi, The Director of the International			
	Research Center for Color Science and Art, TPU			
17:10~17:20	休憩 Break			
17:20~18:20	展示見学&懇談会 Exhibition Tour and Conversazione			

※TPU・・・Tokyo Polytechnic University(東京工芸大学)の略

主催 / 協賛

Organizer/Sponsorship

- 主催:東京工芸大学 色の国際科学芸術研究センター
- **Organizer** : The International Research Center for Color Science and Art, Tokyo Polytechnic University

協賛学会 / Academic Supporting Organizations:

·日本印刷学会 / The Japanese Society of Printing Science and

Technology

- ・日本画像学会 / The Imaging Society of Japan
- ·画像電子学会 / The Institute of Image Electronics Engineers of Japan
- ・日本色彩学会 / The Color Science Association of Japan
- ・日本写真学会 / The Society of Photography and Imaging of Japan
- ・日本写真芸術学会 / The Japan Society for Arts and History of Photography

色の国際科学芸術研究センター, 第4回国際シンポジウム 2023

--- カラーサイエンス&アートの魅力---

The 4th International Symposium 2023 by the International Research Center for Color Science and Art

学長からのご挨拶 吉野 弘章



東京工芸大学は、1923(大正12)年に日本で初めての写真専 門の高等教育機関である小西寫眞専門学校として創立しました。 その建学の精神は、テクノロジーとアートが融合した当時最 先端のメディアであった写真の教育と研究を通して人材を育成 し、広く社会の発展に貢献するというものでした。

2023(令和5)年の今年、本学は創立100周年を迎えました。この100年の間に社会や人々の生活は大きく変化しました。そして本学は工学部と芸術学部の2つの学部を擁する総合大学へと大きく発展を遂げました。

しかし現在の本学もまた、最先端のテクノロジーとアートの融 合を推進し、新たな価値を創造することを教育と研究の目標と しており、その建学の精神は一貫して受け継がれています。

2016(平成 28)年度に、文部科学省の私立大学研究ブランディング事業に採択されたことを契機として、色の国際科学芸術研究センターが設立されました。本センターは、本学のルーツである写真、 印刷、光学といった学問分野に根差し、今日の工学部と芸術学部の二つの学部に共通する全学的な研 究テーマとして「色」を取り上げた国内の大学で唯一の「色」の国際的な研究拠点です。

カラボギャラリー(col.lab Gallery)は、「色」について楽しく学ぶことができる公開施設であり、 「色」の研究成果を、写真、映像、拡張現実、プロジェクションマッピング、CG 等の最新のメディア アートの手法によって情報発信する、テクノロジーとアートの融合を推進する本学ならではの取り組 みと言えるでしょう。

本学は色の国際科学芸術研究センターの活動を通して、次の100年に向けて、未来を創造する科学と 芸術の発展に資することを目指してまいりますので、これからも本学の取り組みにご期待ください。

センター長からのご挨拶 野口 靖



東京工芸大学 色の国際科学芸術研究センターは、おかげさ まで、この度「第4回国際シンポジウム 2023」を開催する運び となりました。創立100周年の年に無事にシンポジウムを開 催できることを大変喜ばしく感じております。

今回のシンポジウムは、「カラーサイエンス&アートの魅力」 をテーマとし、関連する各分野からお招きした4名の専門家のk 基調講演と、本学教員による10件の多様な「色」の研究成果の 報告を予定しております。

本センターは、2016年度の文部科学省による「私立大学研究 ブランディング事業」の選定事業の一環として発足して以 来、「色」に関する工芸融合プロジェクトを積極的に推し進め

て参りました。さらに、令和3・4年度は文化庁の「大学における文化芸術推進事業」にも採択され、新たな展開を見せております。これまでに本センターの助成を受けた研究課題は61件に上り、附属の展示施設であるカラボギャラリーでは、現在、第10回となる企画展「色を記録する展」が開催中です。

この3年間、世界は新型コロナウィルス感染症対策に追われ、シンポジウムや展示などのイベント開 催がままならない時期が長く続きました。しかし、ワクチンや治療薬の普及によって徐々にこの危機を 乗り越えようとしています。また、オンラインのコミュニケーションが一般的になったことによって、 対面でのコミュニケーションによる相互理解の重要性が再評価された時期だとも言えます。

このような背景のもとで、本シンポジウムは、感染症対策に万全を期した上で、会場とオンラインで の開催を同時に行なう予定です。また、工学研究科及び芸術科学研究科にまたがる本センターの工芸融 合機関としての特性を活かし、「ロ頭発表と展示会」という形式で研究成果を公開する予定です。会場でご 参加の方は、展示会場にもぜひ足をお運びください。

東京工芸大学色の国際科学芸術研究センターは、国内の大学で唯一の「色の国際科学芸術研究拠点」としての使命を果たすべく、今後も持続可能な活動を続けて参ります。

Invited lectures

北岡 明佳氏(立命館大学教授) Akiyoshi KITAOKA (Prof. of the Psychology, Ritsumeikan University)



Akiyoshi Kitaoka is a professor of psychology at the College of Comprehensive Psychology, Ritsumeikan University, Ibaraki, Osaka, Japan. He is the president of the Vision Society of Japan. He received a BSc from the Department of Biology, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan in 1984, and received a PhD degree from the Institute of Psychology, University of Tsukuba in 1991. He received the "Gold Prize" of the 9th L'ORÉAL Art and Science of Color Prize in 2006, and the "Award for Original Studies" from the Japanese Society of Cognitive Psychology in 2007. He extensively studies visual illusions including geometrical illusions, lightness illusions, color illusions, mo-

tion illusions and other visual phenomena including visual completion or perceptual transparency. He also produces a variety of "illusion works" and exhibits them in his webpages

(https://www.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/index-e.html). The most popular illusion work is "Rotating snakes", which was created in 2003 as an image of the optimized Fraser-Wilcox illusion. He wrote more than ten books of visual illusions or illusion designs.

栗木 一郎氏(埼玉大学教授)

Ichiro KURIKI (Prof. of the Graduate School of Science and Engineering, Saitama University)



Dr. Ichiro Kuriki is a Professor of the Department of Information and Computer Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, Japan. He received his Bachelor's degree from the Faculty of Engineering, the University of Tokyo in 1991, and received his Ph.D in 1996 from Tokyo Institute of Technology Graduate School. He achieved a scholarship from the Japanese Ministry of Education (Monbusho) as an International Exchange Student and worked with Professor Donald I.A. Mac-Leod at the Department of Psychology, University of California, San Diego. He was an Assistant Professor at Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology (1996-1999) and at the Graduate

School of Engineering, the University of Tokyo (1999-2001). He worked for NTT Communication Science Laboratory (2001-2005) before joining Research Institute of Electrical Communications, Tohoku University, as an Associate Professor (2006-2021). His research interest is in the mechanisms of human color vision, mainly in the cortical representation of color and the mechanisms of color constancy. The research has been conducted by using various methods, including psychophysics, functional brain-imaging techniques (fMRI, EEG, MEG, NIRS), computational models, and clinical case studies.

アルムート・ケルバー氏(ルンド大学教授)

Almut Kelber (Prof. of the Department of Biology and the member of the Lund Vision Group, Lund University)



Prof. Almut Kelber is a member of the Lund Vision Group, at Lund University, Sweden. She studied Biology at the Universities of Mainz, Tübingen and Sussex. After her PhD work on visually guided behaviour of stingless bees in Brazil, she started working on animal colour vision, first, at the University of Tübingen, on studying the diurnal hummingbird hawkmoth, then at the Australian National University, on a Papilionid, the Orchard butterfly. Since 1998, she has been working at Lund University, where she has been a professor since 2007. Besides discovering that some animals can perceive colour at night when humans are colour-blind, She has worked on colour vision abilities and ecology of bees, butterflies, moths, horses, frogs, geckos, and birds. Since 2014, she has been a han-

dling editor of the Journal of Experimental Biology, Cambridge. Presently, while still an adjunct professor at Lund University, she works as director of Research Grants, at the Human Frontier Science Program Organisation, Strasbourg.



アンナ・フランクリン氏(サセックス大学教授) Anna Franklin (Prof. of the Sussex Colour Group & Baby Lab, University of Sussex)

Anna Franklin is a Professor at the University of Sussex and leads The Sussex Colour Group & Baby Lab. She set up a Bab Lab during her PhD at the University of Surrey and was awarded a postdoctoral fellowship from the Economic and Social Research Council to further develop her infant research. She was a Visit-

ing Scholar at the University of California, Berkeley in 2010, and was promoted to Professor at the University of Sussex in 2015. She has published over 80 publications on perceptual development and color perception and co-edited the Handbook of Color Psychology in 2015. She has recently reviewed the development of colour perception in an invited review published in the Annual Review of Psychology. A major funder of her research has been the European Research Council who have awarded her with Starting, Proof of Concept and Consolidator grants. Her research has also been funded by industry and the findings of her research have informed the design of TV, books, drama and art such that they are optimized for infant and child perception.

Spatial color mixing and color illusions

Akiyoshi Kitaoka

Faculty of Comprehensive Psychology, Ritsumeikan University, 2-150 Iwakura-cho, Ibaraki, Osaka 567-8570, Japan

ABSTRACT

Any color can be made from black and white stripes. In this article, I will explain the principles of color illusion based upon spatial color mixing and show how it is created.

1. INTRODUCTION

Color illusions can be classified into color assimilation and color contrast. Both are hue illusions. Color assimilation is a phenomenon in which the color of a target area is perceived as the same hue as the surrounding color. Fig. 1 shows an example.



Fig. 1 This picture is grayscale; however, by placing colored lines on it, it appears a color image.

Color contrast is a phenomenon in which the hue of the target area is perceived in the opposite direction to that of the surrounding colors. Fig. 2 shows an example.



Fig. 2 The window area of this train appears red; however, none of the pixels have a red hue; they are all gray, grayish blue-green, or grayish green.

Here, I introduce a new color illusion based on spatial color mixing. This color illusion has properties of both assimilation and contrast.

2. SPATIAL COLOR MIXING

Studies have shown that if three appropriate colors are chosen, a full-color image can be represented. These primary colors are typically red, green, and blue. They can be mixed by projecting them in the same location, or by placing them side by side. The latter is referred to as spatial color mixing. Fig. 3 shows an example of this.



Fig. 3 This image is composed of lines of three colors: red, green, and blue.

As spatial color mixing involves three primary colors being placed side by side, it allows room for each color to mix with the other two. What happens if we add green to the red lines, blue to the green lines, and red to the blue lines? Subsequently, Fig. 4 is obtained. Although Fig. 4 is brighter than Fig. 3 because of the added colors, there is no issue with its appearance [1].



Fig. 4 This image is composed of lines of three colors: yellow to green, cyan to blue, and magenta to red.

Moreover, what happens if we add blue to the yellowto-green lines, red to the cyan-to-blue lines, and green to the magenta-to-red lines? Subsequently, Fig. 5 is obtained. Although Fig. 5 is brighter than Fig. 3 and Fig. 4 because more colors are added, the image is still clearly visible [2]. Fig. 5 can be represented as spatial color mixing of cyan, magenta, and yellow as the three primary colors. However, this does not imply that subtractive color mixing exists in spatial color mixing.



Fig. 5 This image is composed of lines of three colors: white to cyan, white to magenta, and white to yellow.

3. SPATIAL COLOR MIXING ACCOMPANIED BY COLOR ILLUSION

Fig. 4 was created by adding red, green, and blue colors to Fig. 3. What happens when only green and blue are added to Fig. 3? Precisely, we add green to the red line and blue to the green line. Subsequently, Fig. 6 is obtained. In this image, objects that were originally red appear to be reddish; however, red hues are no longer in the pixels as the pixel colors are yellow to green, cyan to blue, or blue to black. Red is represented by a combination of yellow, blue, and black. This phenomenon could be evaluated as color constancy; however, it can also be recognized as a color illusion.



Fig. 6 This image is composed of lines of three colors: yellow to green, cyan to blue, and blue to black. Perceived red is illusory.

4. SPATIAL COLOR MIXING WITH TWO COLOR LINES

Thus far, three primary colors have been arranged in independent lines. However, it is also possible to place two primary colors in a single line. What happens when the green line and blue one in Fig. 3 are mixed into one line? The mixed line includes green, blue, their mixed colors. Fig. 7 shows an example.



Fig. 7 This image is composed of lines of two colors: red to black, and mixed colors of green and/or blue to black.

5. SPATIAL COLOR MIXING WITH TWO COLOR LINES ACCOMPANIED BY COLOR ILLUSION

What happens when green and blue are added to Fig. 7? More precisely, as the green and blue are added to the red line, subsequently, Fig. 8 is obtained. In this image, objects that were originally red appear to be reddish; however, red hues are no longer in the pixels because pixel colors are white to cyan or mixed colors of green and/or blue to black. Red is represented by a combination of white and black. Fig. 8 shows the two-color line counterpart of Fig. 6.



white to cyan, and mixed colors of green and/or blue to black.

6. EXAMPLES OF THIS TYPE OF COLOR ILLUSION Fig. 9 shows a demonstration, using a can of Coca-Cola, which gained popularity on social networking sites in 2021. The can appears reddish; however, the reddish section consists of black and white stripes.



Fig. 9 This Coca-Cola can appears reddish, though the image is composed of black and white stripes.

In this example, it is common to suspect that the red color is due to our memory of the brand's famous color; however, this is not the case. To clarify this issue, we can use another example. Observe Fig. 10. Not many people would know about the previous JNR express colors.

In addition, as Fig. 10 is the counterpart of Fig. 2, this technique of painting red objects with black and white stripes shows that it belongs to the phenomenon of color contrast.



the color is composed of black and white stripes.

The examples of illusions shown thus far have been based on photographic subjects and involve red objects. This is because the effect is empirically convincing under these conditions.

This effect can also be achieved using simple illustrations rather than photographs. Fig. 11 shows an example.



Fig. 11 The eye in the left image appears reddish and that in the right appears to be bluish, though both are composed of black and white stripes.

This effect can also be observed in simpler images. Fig. 12 shows an example. The lower right circle that does not overlap with other circles appears yellowish, although the area is composed of black and white stripes.



Fig. 12 The lower right circle that does not overlap with other circles appears yellowish, though the area is composed of black and white stripes.

7. RELATION TO THE MUNKER ILLUSION

The Munker illusion is a phenomenon in which targets are placed on a certain color background, and stripes of another color are placed on top of them. Color assimilation is induced from the color of the stripes, and color contrast is induced from the background [3, 4]. In Fig. 13, the red heart in the upper-left image appears magenta, while that in the upper-right image appears orange. Moreover, the green heart in the lower left image appears cyan, while that in the lower right image appears yellowish green.



Fig. 13 The Munker illusion. The red heart appears magenta (left) or orange (right). The green heart appears to be cyan (left) or yellowish green (right).

The Munker illusion can be explained in the context of spatial color mixing with two primary color lines. For example, Fig. 14 is an image composed of lines of two colors: one shows blue to black and the other displays colors of red and/or green (including yellow hues) to black.

This image shows that magenta, the color of the lower left portion of the circle that does not overlap with other circles, is represented by a combination of red and blue stripes. The background is composed of blue and yellow stripes. These are consistent with the Munker illusion, where the red heart appears magenta in the upper-left image of Fig. 13.

Fig. 14 also shows that cyan, which is painted in the upper portion of the circle that does not overlap with other circles, is represented by a combination of green and blue stripes. The background is composed of blue and yellow stripes. These results are consistent with the Munker illusion, where the green heart appears cyan in the lower left image of Fig. 13.

In addition, the illusory yellow shown in Fig. 12 can also be represented in the form of the Munker illusion in Fig. 15.

8. CONCLUSION

By investigating spatial color mixing, new color illusions are found, and conventional color illusions can also be well explained.

9. ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by JSPS KAKENHI, Grant Numbers 15H01984 and 21H04426.



Fig. 14 The lower left portion of the circle that does not overlap appears magenta, which is composed of red and blue stripes. The upper portion of the circle that does not overlap appears cyan, which is composed of green and blue stripes. The background is composed of blue and yellow, and therefore has the same configurations as those of the Munker illusion shown in the left two images of Fig. 13.

I		Π		I
II				I
II				I
II		II		
II				

Fig. 15 The heart composed of black and white stripes appears yellowish.

10. REFERENCES

- [1] A. Kitaoka, "Illusions based upon new types of spatial color mixing and application to VR," Keynote lecture, 26th Conference of the Virtual Reality Society of Japan, Ritsumeikan University (online) (in Japanese) http://www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/VR2021.html (2021)
- [2] A. Kitaoka, "Spatial color mixing: an algorithm for subtractive color mixing with RGB as the primary colors and its application," The 2016 Summer Conference of the Vision Society of Japan, Toki Messe, Niigata (in Japanese)

http://www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/VSJ2016poster.doc (2016)

- [3] H. Munker, H, "Farbige Gitter, Abbildung auf der Netzhaut und übertragungstheoretische Beschreibung der Farbwahrnehmung" Habilitationschrift, Ludwig-Maximilians-Universität München (1970)
- [4] D. Novick & A. Kitaoka, "The confetti illusion," Journal of Illusion, 2, https://doi.org/10.47691/joi.v2.6152 (2021)

人の色知覚の脳内メカニズム Cortical mechanisms of color perception in humans

<u>栗木一郎</u> Ichiro Kuriki

埼玉大学, 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255 Saitama University, 255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan

ABSTRACT

The mechanism of human color sensation begins with a differential response among three types of cone photoreceptors. However, the further process of opponent-color signals, which is the differential responses of cones, in human visual cortex is not well known. One of our approaches is brain activity measurements with functional MRI (fMRI) or EEG (electroencephalogram). Another type of approach is using psychophysics combined with data- mining technique. The possible locations and types of visual information processing will be shown in this talk, by introducing the progress of our latest studies.

1. はじめに

人の色覚はさまざまな場面で用いられます. 例えば物 を探したり, 果樹の成熟度合いを調べたり, 人の健康状態 を判断するような生活に不可欠な場面もあれば,美術作品 の鑑賞のように純粋に色彩の妙を楽しむ場面もあります. いずれの場合でも、我々は複数種類の色の知覚を活用して います. 大別すると, カテゴリー的色知覚 (categorical color perception) とアピアランス的色知覚 (color appearance) が あります.カテゴリー的色知覚とは、見た目の細かな違い によらず、似た色を1つのグループとして扱う知覚のこと で, 色名呼称はカテゴリー的色知覚の代表例です. アピア ランス的色知覚とは、もう少し詳細な違いに気がつける色 の感覚で、例えば木の葉の色は緑と呼べる色カテゴリーに 属しますが、1枚1枚の葉の色は少しずつ黄色みや明るさが 違います.こうした微細な色の違いを我々は日常的にかつ 絵画的に経験しています. 我々の視覚系は, 1つの色に対 してこのように異なるモードの色知覚メカニズムを,多段 階的にかつ無意識に使い分けています.

視覚系の色に関する信号は錐体応答から始まり,網膜 のなかで錐体反対色信号 (cone-opponent signal) に変換さ れた後に脳へ送信されることが知られています[1, 2]. し かしながら,脳に入った直後の色情報の変換過程について はよく知られていません.記憶や色名のような高次の情報 処理になると,色の情報がカテゴリー的に扱われているこ とが知られており [3],また視覚情報を専門に扱う領野の 高次レベル (高次視覚領野)では色情報の表現がカテゴリ ー的になっていることが報告されています[4].

一方で、アピアランス的色知覚に関するモデルの1つ である反対色説において、基軸となる4つの基本色をユニ ーク色 (unique hues) と言います.前述した錐体反対色 信号は赤/緑と青/黄に関連した2つの色信号と光の強度に 関わる輝度信号の3つから成っていますが、この錐体反対 色信号とユニーク色が直接対応していないことが,たびた び報告されています [5,6].では,アピアランス的色知覚 (カラーアピアランス)に対応する神経信号は,脳のどこ でどのように形成されているのでしょうか?

以下では,我々がこの課題にアプローチするために行ってきた研究についてご紹介します.

2. fMRIを用いた研究

2.1 背景

脳活動のデコーディングを用いた研究では,視覚情報 が最初に到達する脳部位である第一次視覚野において,色 情報の信号が錐体反対色信号では表現されていないこと が示されています [7-9]. しかし,いずれも脳内の色情報 表現が錐体反対色形式であることを否定しているだけで, どのような色に対して応答を示す細胞が存在するか,明示 した研究ではありませんでした.一方,マカクサルの電気 生理学的な研究 [10-12] を参考にすると,ヒトの脳にも錐 体反対色以外の色相方向に感度を持つ細胞が存在するこ とが予想されます.そこで,我々は高解像度の機能的MRI (functional magnetic resonance imaging; fMRI)を用いた脳 活動計測技術を用いて,脳内の神経システムの色選択性に ついて調べました[13].

2.2 方法

理化学研究所脳科学総合研究センター(RIKEN BSI;当時)が保有する静磁場強度 4.1テスラのMRI装置を用いて 実験を行いました.参加者は色覚正常な3名で,いずれも 実験時には書面で同意書を提出し,研究倫理審査の承認を 得て行われました.

視覚刺激は, 錐体反対色信号の2つの色相を軸とする等 輝度平面において, 色相環上を連続的に変化する図形を呈 示しました. 1周期は24秒間で, 1周期半 (32秒)の刺激呈 示の後, 28 秒の空白を挟んでこのサイクルを繰り返し, その間の脳活動を測定しました. 解析は画素ごとのMRI 信号の時間変化を周波数分析し, 1周期の色相環の呈示の 中で最も信号値が高かった色相をその画素の選択性とし て定義しました. 視覚野 (V1, V2, V3, V4) ごとに色相選択 性の画素数を計数し, ヒストグラムの形で結果を得ました. 2.3 結果・考察

図1(a)は第一次視覚野(V1)における3名の参加者別の 色選択性ヒストグラムを示しており、中心からの距離が分 布頻度を示しています.明らかに、強い異方性を示してお り、2軸の中間方向に強い選択性を示す画素の存在が示さ れました.図1(b)は3名の平均を視覚野別に示しています が、V1からV4へ移るに従って、徐々に異方性が緩和され ていく様子を見ることができます.



一方で電気生理学的な研究[11,12]と異なり,2軸の方 向のうち横軸(L-M)方向に選択的な画素がほとんど見ら れませんでした.これは,fMRI画素の解像度(2x2x3mm³) と神経細胞の大きさの関係に起因すると考えられ[14],例 えば反対の色相に選択的な細胞がこの画素の中に同数存 在した場合,今回の解析方法では色選択性が示されません. 従ってfMRIで得られた結果は,中間色方向に選択的な神 経細胞の存在を強く示唆する結果ではあったものの,色選 択性を網羅的に知るという観点では不完全でした.

3. 脳波成分を用いた研究

3.1 背景 (SSVEP)

SSVEP (steady-state visual evoked potential) は脳波成分の 1つで、様々な視覚研究に用いられています [14]. この技 術は、一定の時間周波数で点滅させた視覚刺激に対し、同 じ周波数の脳波成分が誘発される性質を利用する方法で、 脳波信号と視覚刺激の対応が1:1で得られる利点がありま す. 我々は、色が変化する刺激を観察中のSSVEPを測定し、 色相に対する選択性のプロファイルを得ました[15].

3.2 方法

視覚刺激はfMRI研究と同様の物を用い,色は色相環上 を24秒1周期で連続的に変化し,図形は5Hzでパターンを 反転しました.その間に脳波計(BrainAmp MRI+,32chパ ッシブ電極; Brain Products, Germany)で脳波を測定しまし た.参加者は色覚正常な16名で,実験時に書面で同意書を 提出し,研究倫理審査の承認を得て行われました.

3.3 結果と考察

視覚刺激と同じ5HzのSSVEP成分に注目して解析を行ったところ、全被験者の平均は図2のようになりました. この図の2軸は錐体反対色軸で、3色の線が視覚刺激の3 段階の彩度(Full, Half, Quarter)に対する応答を示し、原 点からの距離が脳波成分の振幅,影のついた領域が被験者 間の95%信頼区間を示しています.

この結果は、3つの彩度に対してSSVEP振幅が単調増加 する傾向を明らかに示しており、SSVEP振幅が色に対する 応答であることを明らかに示しています.また、振幅の形 状が2軸に対して非対称で、60°-240°方向に伸長している ことから、SSVEP応答が錐体反対色のみに基づくものでは ないことを示しています.



Figure 2: SSVEP hue selectivity [15]

60°-240°方向の伸長が何に起因するものかを検討した 結果、この方向の非対称性をもたらすのは知覚的な彩度の 違いによるという結論を得ました.錐体反対色座標系にお いて、知覚的に等色差の視標であるマンセル表色系の等ク ロマ曲線をプロットすると、約150°-330°の方向に傾い た楕円になります(図3). 我々の刺激の彩度はこの座標 系では円形だったため、第1・第3象限では見た目の彩度が 相対的に高かったのに対し、第2・第4象限では相対的に低 かったことになります. SSVEP振幅が、3段階の彩度に対 して単調増加で変化することから、SSVEP振幅の形状は、 第1・第3象限方向の彩度刺激が強く第2・第4象限方向の彩 度刺激が弱かったことに起因すると予想できます.



Figure 3: Munsell iso-chroma locus in cone-opponent space [15]

この仮説を検証するため、計算モデルによるフィッテ ィングを行った結果、我々が得た SSVEP 振幅のプロファ イルは約60%が知覚的彩度に対応した応答、約40%が錐体 反対色メカニズムに対応した応答だったことが判明しま した[15]. 部分的ではあれ、ようやくアピアランス的色知 覚 (カラーアピアランス) に関する脳活動を測定すること に成功したと考えることができます.

一方で,SSVEPの測定結果には,実験参加者間で顕著 な個人差が認められました[16]. 錐体反対色メカニズムの 個人差があるとすれば,この2軸に沿った変形になると予 想されますが,それ以外の方向の振幅プロファイルの違い は,明らかにカラーアピアランスに関する個人差を反映し ているものと考えられます.この個人差が何の知覚と対応 しているかは現在研究を進めている最中です.

4. カテゴリー的色知覚

4.1 背景

fMRI研究およびSSVEP研究を通して、アピアランス的 色知覚に関わる脳内の情報処理は顕著な個人差を持って いることが明らかになりました.これは我々の日常的コミ ュニケーションにおいて問題になるのでしょうか.

我々が日常的に色について会話をする時,ほぼ全ての 場合で色名を用います. 色名については,言語に関わらず 共通して存在する11基本色 [18] がよく知られています. この11基本色以外にも我々は色名を使いますが,例えば 「ピンク」と「桃色」のように同じ色に対して別々の言葉 を使うことがあります.このように個人による用語の差は, 色カテゴリーが異なるものとして扱うべきでしょうか?

4.2 方法

この問題に対処しつつ、日本語の色カテゴリーの特徴 を明らかにするため、我々はLindsey & Brown [19] が北米 英語に対して行ったのと同じ手法を日本語において実施 しました[20]. 具体的には、無彩色10色と有彩色320色に 対し、57名の実験参加者に1色ずつ1語の好きな色名をつ けてもらう実験をしました.ある参加者が同じ色名で呼ん だ色票に1を、それ以外に0を割り当てると、「1人の実験 参加者がある色名で呼んだ色票グループ」を0/1 (バイナ リ)で表現することができます.これを57名の実験参加者 の全色名に対して行い、有彩色に対し 858 のバイナリパタ ーンのデータを得ました.このデータを、パターンの類似 性に分類すると、言葉に関わりなく、色グループ自体の類 似性を評価できるようになります.

4.3 結果·考察

我々はこのようにして得たデータから,色カテゴリー として日本語話者に共通する色のグループの最小値,すな わち最も基本的に共通する色カテゴリーの数を求めまし た.その結果,カテゴリー数は無彩色3色を含む19色とな りました.有彩色16色について,実験参加者の間で共通し てグループとして扱われた色票を濃淡で示したのが図4で す.また,80%以上のコンセンサスを得た領域を図5右上 に示していますが,色空間の広い範囲を占めていることが わかります.カテゴリーの境界部分に曖昧さはあるものの, それぞれの色カテゴリーの位置や広さは多くの日本語話 者の間で共通していると考えられます.



Figure 4: basic color categories in Japanese [20]

同じ手法での実験を台湾の共同研究者の研究室でも実施しました.中国語では同義語が多く,過去の研究では色名の同意に関する議論が多く,基本色が特定できませんでした. Lindsey & Brown [19]の方法を用いると,言語的な問題にとらわれずに色カテゴリーの領域を特定できます.

その結果,中国語の基本色名は11基本色 [18] と同じ有彩 色8色名+無彩色3色名になりました.

この3言語の有彩色データを、それぞれ8つのグループ に分類した時の色カテゴリーを比較したのが図5ですが、 3言語の間で高い類似性が見られることがわかります.従って、表面的な用語によらず、基本色については個人間・ 言語間で高い共通性があることがわかりました[21].



Figure 5: Basic color categories across three languages.[21]

4.総合的考察

これらの研究から,以下のことがわかります.まず, 脳内の色情報の表現形式は,錐体反対色信号そのままでは ありません[9,13,15].脳内において,錐体反対色信号か らアピアランス的およびカテゴリー的色知覚の信号へと 変換が行われていることを示しています.我々のfMRI研 究[13]では,中間色に選択的な応答を示す神経系の存在が 顕著に見られました.また,SSVEP研究[15]では,より網 羅的に色に対する神経活動が見られ,錐体反対色信号とカ ラーアピアランスに関する信号を同時に観測しました.脳 活動計測を用いた研究で,カラーアピアランスに関連して いると考えられる信号が示されたのは初めてです.

一方,fMRI研究[13],SSVEP研究[15]ともに脳内の色情 報表現には大きな個人の存在が示されましたが,色カテゴ リーに関する特性を調べると,色の言葉としての表現には 大きな個人差は見られませんでした[19-21].日常,我々が 同じ物を見て同じ色名を使うことから分かるのは,入力 (視覚)と出力(言語)の関係の整合性だけです.我々の 観測した脳活動データの個人差[13,15]は,脳内の色情報に は言葉では見えない高い自由度があることを示唆してい ます.行動においてそれを反映しているのが,色の好みの 個人差などかもしれません.

脳内における色情報表現については、以下のような知 見もあります.マカクサルの下側頭皮質には、人間の色カ テゴリーのような色選択性を示すニューロンの存在が報 告され[22]、中には緑のサブカテゴリーである黄緑や青緑 に選択性を持つものがあります.人間の脳内の色情報処理 にもこうしたサブカテゴリーに対応する神経細胞が存在 し,親や社会とのコミュニケーションを経て共通な色カテ ゴリーに集約されていると考えられています.また,Yang らが報告した乳幼児の脳活動の研究[23]では、言語獲得前 の生後5-6ヶ月の乳幼児も緑と青を区別する脳活動が示さ れました.同時に行われた行動実験でも、乳幼児の青と緑 の境界は大人と相違がありませんでした.これも言語には 脳内の色情報処理が現れない事を示す知見ですが,こうし た色のグループ化が乳幼児[23]や他の霊長類[22]にも存在 することは、言語や文化依存ではない、何らかの共通のメ カニズムの存在を示唆しています.

こうした知見を元に,現在も脳活動や知覚の個人差に 着目してカラーアピアランスやカテゴリーの基盤となる 神経メカニズムの解明を試みています[24,25,26].これら の研究をさらに進め,少しでも色の見え方のメカニズムの 解明に近づきたいと考えています.

6. 謝辞

本講演で紹介した研究は,以下の共同研究者と実施し ました(敬称略;所属は研究当時).fMRI研究[13]:Kang Cheng, Pei Sun,上野賢一,田中啓治(理化学研究所). SSVEP研究[16]:金子沙永(東北大学),Søren K. Andersen (University of Aberdeen, U.K.). 色カテゴリー研究[20,21]: Delwin T. Lindsey, Angela M. Brown, Ryan Lange (Ohio State University, U.S.A.),徳永留美,塩入諭(東北大学),内川 恵二,福田一帆,武藤ゆみ子(東京工業大学),Tracy J. Hsieh (中国文化大学,台湾),I-Ping Chen(国立交通大学,台 湾).乳幼児の脳活動[23]:山口真美,楊嘉楽(中央大 学),金沢創(日本女子大学);最近の研究[24-26]:有 馬隆人,浜野剛,宮塚諒太(埼玉大学).

これらの研究は以下の科研費補助金の助成を得て行われました: 24330205, 15H03460, 18H04995, 20H00597.

6. REFERENCES

- Derrington, A. M., Krauskopf, J., & Lennie, P. (1984). Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque. *Journal of Physiology*, 357(1), 241-265.
- [2] Kaiser, P. K., & Boynton, R. M. (1996). *Human color vision* (The Optical Society of America, U.S.A.).
- [3] Boynton, R. M., Fargo, L., Olson, C. X., & Smallman, H. S. (1989). Category effects in color memory. *Color Research & Application*, 14(5), 229-234.
- [4] Brouwer, G. J., & Heeger, D. J. (2013). Categorical clustering of the neural representation of color. *Journal of Neuroscience*, 33(39), 15454-15465.
- [5] De Valois, R. L., De Valois, K. K., Switkes, E., & Mahon, L. (1997). Hue scaling of isoluminant and cone-specific lights. *Vision research*, *37*(7), 885-897.
- Webster, M. A., Miyahara, E., Malkoc, G., & Raker, V. E. (2000). Variations in normal color vision. II. Unique hues. *JOSA A*, 17(9), 1545-1555.
- [7] Parkes, L. M., Marsman, J. B. C., Oxley, D. C., Goulermas, J. Y., & Wuerger, S. M. (2009). Multivoxel fMRI analysis of color tuning in human primary visual cortex. *Journal of Vision*, 9(1), 1-1.
- [8] Goddard, E., Mannion, D. J., McDonald, J. S., Solomon, S. G., & Clifford, C. W. (2010). Combination of subcortical color channels in human visual cortex. Journal of vision, 10(5), 25-25.
- [9] Kuriki, I., Nakamura, S., Sun, P., Ueno, K., Matsumiya, K., Tanaka, K., ... & Cheng, K. (2011). Decoding color responses in human visual cortex. *IEICE transactions on fundamentals of electronics, communications and computer sciences, 94*(2), 473-479.
- [10] Lennie, P., Krauskopf, J., & Sclar, G. (1990). Chromatic mechanisms in striate cortex of macaque. *Journal of Neuroscience*, 10(2), 649-669.
- [11] Hanazawa, A., Komatsu, H., & Murakami, I. (2000). Neural selectivity for hue and saturation of colour in the

primary visual cortex of the monkey. *European Journal of Neuroscience*, *12*(5), 1753-1763.

- [12] Wachtler, T., Sejnowski, T. J., & Albright, T. D. (2003). Representation of color stimuli in awake macaque primary visual cortex. *Neuron*, 37(4), 681-691.
- [13] Kuriki, I., Sun, P., Ueno, K., Tanaka, K., & Cheng, K. (2015). Hue selectivity in human visual cortex revealed by functional magnetic resonance imaging. *Cerebral Cortex*, 25(12), 4869-4884.
- [14] Cheng, K. (2016). What we have learned about human primary visual cortex from high resolution functional magnetic resonance imaging. *Magnetic Resonance in Medical Sciences*, 15(1), 1-10.
- [15] Norcia, A. M., Appelbaum, L. G., Ales, J. M., Cottereau, B. R., & Rossion, B. (2015). The steady-state visual evoked potential in vision research: A review. *Journal of vision*, *15*(6), 4-4.
- [16] Kaneko, S., Kuriki, I., & Andersen, S. K. (2020). Steady-state visual evoked potentials elicited from early visual cortex reflect both perceptual color space and cone-opponent mechanisms. *Cerebral Cortex Communications*, 1(1), tgaa059.
- [17] Kaneko, S., Kuriki, I., & Peterzell, D. H. (2021). In search of early cortical mechanisms for color: individual variability in steady-state VEP amplitudes for hues sweeping around the isoluminant LM and S cone-opponent plane. *Journal of Vision*, 21(9), 2453-2453.
- [18] Berlin, B., & Kay, P. (1991). *Basic color terms: Their universality and evolution*. Univ of California Press.
- [19] Lindsey, D. T., & Brown, A. M. (2014). The color lexicon of American English. *Journal of vision*, 14(2), 17-17.
- [20] Kuriki, I., Lange, R., Muto, Y., Brown, A. M., Fukuda, K., Tokunaga, R., Uchikawa, K., Lindsey, D. T., & Shioiri, S. (2017). The modern Japanese color lexicon. *Journal of vision*, 17(3), 1-1.
- [21] Hsieh, T. J. T., Kuriki, I., Chen, I. P., Muto, Y., Tokunaga, R., & Shioiri, S. (2020). Basic color categories in Mandarin Chinese revealed by cluster analysis. *Journal of vision*, 20(12), 6-6.
- [22] Komatsu, H., Ideura, Y., Kaji, S., & Yamane, S. (1992). Color selectivity of neurons in the inferior temporal cortex of the awake macaque monkey. *Journal of Neuroscience*, *12*(2), 408-424.
- [23] Yang, J., Kanazawa, S., Yamaguchi, M. K., & Kuriki, I. (2016). Cortical response to categorical color perception in infants investigated by near-infrared spectroscopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(9), 2370-2375.
- [24] 浜野 剛, 上野賢一, 栗木一郎. 色カテゴリーとカ ラーアピアランスに関する脳内処理経路の比較. VISION, 34(4), 144.
- [25] 有馬隆人, 上野賢一, 栗木一郎 (2022) 色カテゴリー とカラーアピアランスの脳内情報処理に対する文字 課題の影響. VISION, 34(4), 150.
- [26]. 宮塚諒太,金子沙永,栗木一郎 (2022)携帯型脳波計 による定常視覚誘発電位の色相選択性測定の試み. VISION, 34(4), 149.

Limits of animal colour vision

Almut Kelber

Lund Vision Group, Department of Biology, Lund University, Sölvegatan 35, 22362 Lund, Sweden

ABSTRACT

Colour discrimination is based on opponent photoreceptor interactions, and limited by receptor noise. Noise limits the discrimination of very similar colours. Behavioural tests on chickens show that in the visible range, discrimination thresholds of birds and humans are rather similar. In dim light, photon shot noise impairs colour vision, and in vertebrates, the absolute threshold of colour vision is set by dark noise in cones. Nocturnal bees and moths, frogs and toads which possess two types of rods and nocturnal geckos lacking rods have adaptations to reduce receptor noise and use chromatic vision even in very dim light.

1. INTRODUCTION

Human colour vision is based on our possession of three types of cone photoreceptors. Spectral resolution is limited by the width of their sensitivity curves, by receptor noise, and by the number of photons that is available for vision. In low light levels, human colour vision fades away and colour-blind vision, based on one type of rod photoreceptors remains until we reach the absolute threshold of vision.

A large number of animal, both vertebrates and invertebrates, are using colour vision for phototaxis and for detecting and discriminating food, mates, landmarks or their home [1,2]. How well they can use colour information depends on the number of photoreceptor types they use for the task, the noise level in the receptors but also the light intensity at which they are active.

Using dual choice training and testing procedures, we test animal colour vision in semi-natural settings and determine discrimination thresholds.

In the present paper, I will first present our evaluation of the colour discrimination thresholds of a bird, as compared to humans. Birds have 4 spectral types of cones and are commonly assumed to strongly depend on colour vision and thus, should have high discrimination ability [3]. We tested the birds in bright and dim light and compared their performance with that of human subjects. Second, I will review what is known on the absolute thresholds of colour vision in dim light levels, and present our data on animals in which this has been evaluated [4].

2. COLOUR DISCRIMINATION THRESHOLDS IN CHICKENS



A chicken chick making a choice between a rewarding and an empty food cube, using colour vision.

Fig. 1

Chickens were trained to discriminate food cubes of different colours, and tested with colours of increasing similarity. Colour differences were determined using the Receptor Noise Limited (RNL) model of colour discrimination (see [5, 6] for the model).



Fig. 2. Chicken and human colour discrimination in bright light have similar thresholds (same JND scale is used for both)

Both, for colours in the red and green colour range, we found that the discrimination abilities of chickens and humans were similarly good in light levels of 10 to 250 cd/m2. In dim light (less than 1 cd/m²), discrimination thresholds increased. We also saw that discrimination in dim light was better for larger stimuli, likely due to spatial pooling mechanisms. Chickens lost colour vision in light levels below 0.1 cd/m², which is moonlight intensity [4].

3. ABSOLUTE INTENSITY THRESHOLDS

The intensity threshold of colour vision that we found for chickens is higher than that of humans but similar to that of other birds such as budgerigars [4, 5].



Fig. 3 Intensity thresholds of colour vision in selected species of animals. Coloured lines indicate colour vision, grey lines achromatic vision of a species (for details see Kelber et al 2017).

Most mammals other than primates are dichromats [1] and even nocturnal of arrhythmic species with highly sensitive eyes, such as the horse, loose colour vision at similar light levels as humans, and rely on rod vision at night [4].



Fig. 4 a gecko making a choice between two stimuli associated with a tasty (left) and a salted (right) cricket.

Other than mammals and birds, lizards have a retina without rods, and thus, nocturnal species such as geckos use cones to see in dim light. Accordingly, they have adaptations allowing them to see colour at somewhat lower light intensities than birds and mammals [7].

Amphibians such as frogs and toads, by contrast, have two types of rod photoreceptors sensitive to blue and green light [8]. They use colour for mate

selection, food choice and phototaxis. Their colour discrimination of mates breaks down in rather bright light levels, and they discriminate food items by colour in about ten times dimmer light than humans, because of the higher sensitivity of their cones. However, their phototaxis is colour-guided even at their visual threshold, which is lower than that of humans, clearly proving their use of rod-based colour vision.

Finally, invertebrates do not have a dual retina with rods and cones but use the same photoreceptors in all light intensities. Each species has adaptations of their eyes and visual system to the light environment in which they are active. Nocturnal insects tend to have highly sensitive photoreceptors and mechanisms such as spatial and temporal pooling allowing for high sensitivity [9. As a result, some nocturnal species such as large carpenter bees and moths can use colour vision even in starlight levels at which humans and most vertebrates are colourblind [9,10].

4. ELECTRONIC DATA

This is a review paper and no electronic data are presented. All information is found in the references.

5. REFERENCES

[1] A. Kelber, G. Jacobs, Evolution of color vision. In: J. Kremers, R. Baraas and J. Marshall (eds) Human Colour Vision. Springer Nature, New York, pp. 317 – 354, (2016)

[2] A. Kelber, M. Vorobyev, D. Osorio, Animal colour vision – behavioural tests and physiological concepts. Biol. Reviews 78, 81 – 118, (2003)

[3] A. Kelber, A Bird colour vision – from cones to perception. Curr. Opin. Behav. Sci. 30, 34-40 (2019)

[4] A. Kelber, P. Olsson and C.A.M. Yovanovich, Thresholds and noise limitations of colour vision in dim light. Phil. Trans. R. Soc. B 372, 20160065 (2017)

[5] P. Olsson, O. Lind and A. Kelber, Bird colour vision: Behavioural thresholds reveal receptor noise. J. Exp. Biol. 218, 184 – 193 (2015)

[6] J.P. Renoult, A. Kelber, M.H. Schaefer, Colour spaces in ecology and evolutionary biology. Biol. Rev. 92, 292 – 315, (2017)

[7] Roth, L. S. V. & Kelber, A. (2004) Nocturnal colour vision in geckos. Proc. R. Soc. Lond. B (Suppl.) S6, S485 – S487

[8] C.A.M. Yovanovich, S.M. Koskela, N. Nevala, S. L. Kondrashev, A. Kelber and K. Donner, The dual rod system of amphibians supports colour discrimination at the absolute visual threshold. Phil. Trans. R. Soc. B 372, 20160066 (2017)

[9] A. Yilmaz, N. Hempel de Ibarra and A. Kelber, High diversity of arthropod colour vision – from genes to ecology. Phil. Trans. R. Soc. B 377, 20210273 (2022)

[10] C.J. van der Kooi, D.G. Stavenga, K. Arikawa, G. Belusic and A. Kelber, Evolution of insect colour vision: from spectral sensitivity to visual ecology. Ann. Rev. Entomol. 66, 435 – 461 (2021)

What can Babies tell us about Color, Art and Design?

Anna Franklin

The Sussex Colour Group & Baby Lab, University of Sussex, Falmer, BN1 9RH, UK

ABSTRACT

Investigating how infants perceive visual stimuli provides insight into visual development as well as the mechanisms of visual perception in its mature form. We show that studies of infant color perception help us understand color phenomena such as color categorization, color preference, and the calibration of color to the environment. We also show that investigating infants' visual preferences for art can inform debate on the role of low-level sensory processes in aesthetics. Finally, we outline how we have applied this research to inform the production of visual experiences such as drama, art and books that are optimized for infant perception.

1. INTRODUCTION

Over the last 70-80 years, infant science has provided an understanding of how babies see, think and learn. The pioneering studies of Robert Fantz which measured how long infants look at basic visual stimuli such as colored checkerboards, bullseyes and squares, demonstrated that even newborn infants look preferentially at certain visual characteristics [e.g., 1]. Since then, infant science has developed methods that measure infant looking time to stimulus pairs (e.g., preferential looking) and to changes in stimuli (e.g., novelty preference), and has also adapted psychophysical and neuroimaging methods to be suitable for use with infants. Infant studies using these methods have enabled an understanding of how various aspects of perception develop such as color, depth, motion and face perception.

2. INFANT COLOR PERCEPTION

2.1 Development of Color Vision

Although Fantz found that young infants prefer to look at black and white high contrast patterns than large patches of color [2], subsequent research established that even newborn infants do in fact have some, albeit limited, color vision [3]. For example, around three quarters of newborn infants will orient towards a large patch of saturated red [3]. This color vision rapidly develops over the first few months of life such that by 2-3 months infants are 'trichromatic': the three cone types and the resulting two neural subsystems that underpin color vision are functional by this age [e.g., 4]. However, sensitivity to color at this age is still poor and colors need to be highly saturated for infants to be able to detect them [5]. Color vision thereafter steadily improves with development, with a peak in sensitivity in late adolescence ([4], see also [6] for a review]).

2.2 Addressing Questions about Color

Beyond characterizing what colors infants can see and

at what age, research has also investigated how various perceptual color phenomena manifest in infancy. Studies have investigated when infants use color cues to individuate objects [e.g., 7], recognize the canonical color of objects [8], and perceive chromatic visual illusions [9]. These studies have been informative for understanding the development of perceptual skills in infancy, and for understanding how infants perceive and interact with objects and the world around them [10].

Researching how infants see color also tells us about the color perception of adults in its mature form. For example, evidence that infants respond categorically to color has challenged the notion that color categories are entirely constructed by culture [e.g., 11,12,13]. The finding that infants look longer at colors the more adults like them similarly challenges a purely cultural account of color preference [14]. For both color categorization and color preference, the infant research points to sensory processes at least partially constraining these phenomena. In addition, a recent study finding that 4-6 month old infants' sensitivity to hue aligns with the distribution of chromaticities of natural scenes [15] provides support for the theory that color perception is calibrated to the environment [16].

3. INFANT PERCEPTION OF ART

3.1 Developmental Aesthetics

Infants can also tell us about Aesthetics. If infants look preferentially at a stimulus, this does not necessarily indicate that infants 'like' that stimulus more as infants might look longer for reasons such as complexity, novelty and familiarity [17]. However, similarity between infants' visual preferences and adults' aesthetic preferences could suggest that some aspects of aesthetics can be 'traced back' to early sensory components of our visual systems [18]. Striking similarities between infant looking time and adult liking has been noted for various stimuli such as color (as discussed above, [14]), for faces [19] and moving dot patterns [20].

3.2 Visual Preferences for Art

There have been only a handful of studies that have investigated infants' visual preferences for art [e.g., 20, 21, 22, 23]. One study compared infant looking times and adult preference ratings for a set of 8 pieces of art and found no relationship between the two [20]. However, a recent study [23] has found a significant relationship between infant visual preference and adult pleasantness ratings for a set of 40 Van Gogh landscapes: infant looking accounts for around 13% of the variance in how pleasant adults find the landscapes. Prior studies with adults have shown that a substantial amount of their aesthetic response can be accounted for by low-level image statistics such as contrast, fractal dimension (the amount of self-repeating patterns on multiple scales) and image entropy [e.g., 24]. Analysis of infants' visual preferences for Van Gogh also finds that infants' visual preferences can also be accounted for by chromatic and spatial image statistics, with some similarities in the image statistics that predict infants' and adults' response to the art [23]. The findings suggest that some elements of our response to art can be traced back to the early sensory biases of our visual systems, but that infants' response to art is also a product of their immature and developing vision.

4. OPTIMISING DESIGN FOR INFANT VISION

4.1 Beyond Black and White

Research on infant color perception and infants' visual preferences for art can inform the design of visual experiences for infants such that they are optimized for infants' immature perception. Books and products for babies are often designed in black and white due to the belief that infants require high contrast in order to be able to see the design. Whilst infants' contrast sensitivity and visual acuity is relatively poor compared to later in life [e.g., 25], we know that infants from 2-3 months are also trichromatic [e.g., 4], and by 4-month can even discriminate isoluminant adjacent hues (e.g., blue and green [e.g., 13]). The Goldilocks effect states that perception is optimally stimulated by a level of complexity that is 'just right' for the perceiver's visual ability - too simple and the perceiver will be bored and too complex and the perceiver's attention will not be captured [26]. Therefore, given infants' color vision, black and white designs likely underestimate infants' visual abilities and are unlikely to optimally stimulate infants beyond 2 months. Ongoing research at the Sussex Baby Lab supports this hypothesis, with one currently unpublished study finding that infants look longer at designs when they contain colored elements compared to identical designs that are purely achromatic [27].

3.1 Case Studies of Application to Design

The team at the Sussex Baby Lab have collaborated with artists and designers to apply findings on infants' perception of color and art to produce baby products and visual experiences that are optimized for infant perception. In 2017, the Sussex Baby Lab curated an Art Gallery for babies as part of the British Science Festival. Artists were given a brief on infant perception and were asked to submit art to the show which had characteristics that matched infants' visual abilities and visual preferences. The Sussex Baby Lab team then recorded the eye-movement heat maps alongside the art in a gallery in the public library. Parents and their babies were invited to the event, so parents could find out more about how babies see, and so babies could view the art as well. One of the pieces of art that babies looked at the most is shown in figure 1A (Frog, by Sam Horton).

The Sussex Baby Lab have also discussed findings on infant perception with the company Etta Loves to inform the design of textiles (e.g., muslins and baby mats, <u>www.ettaloves.com</u>) that visually stimulate infants (figure 1B), with the book publisher's Child's Play (<u>www.childs-play.com</u>) to develop a series of Baby Board Books with colors, shapes and details that are optimized for infant vision (figure 1C), and findings have also been applied to the design of professional shows for young babies (see <u>www.filskittheatre.com</u>, figure 1D).



Fig. 1. Examples of the application of infant science to the development of art, textiles, books and drama optimized for infant vision and perception. A: baby looking at Etta Loves' Aqua print, copyright of Etta Loves Ltd. B: 'Frogs', by Sam Horton, shown at the Baby Art Gallery, curated by the Sussex Baby Lab, copyright of Sam Horton. C: The 'Sea: Look Touch

Learn' baby board book from the book series published by Child's Play, copyright of Child's Play.

D: 'Kaleidoscope', a show for 6-18 month olds, produced by Filskit Theatre Company, photo taken by Zoe Manders, copyright of Filskit Theatre Company.

5. CONCLUSIONS

Babies' response to color and art has implications for theoretical debates about perception and aesthetics in their mature form. Babies' response to color tells us that color categories and color preferences have sensory roots, and that color vision also relates to the chromatic environment. Babies' response to art points to the contribution of low-level image statistics to aesthetics. How babies respond to color and art can also inform the design of visual experiences that are optimized for babies.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

6.1 Research Collaborators

I thank Alice Skelton, Philip McAdams, Jenny Bosten and John Maule for collaboration in the investigation of infants' perception of color and art. The Baby Art Gallery was curated by Alice Skelton, John Maule, Lucy Somers and Katie Barnes with the assistance of other members of the Sussex Baby Lab.

6.2 Funding

Funded by the European Research Council (ERC) under the Horizon 2020 research and innovation programme (Project COLORMIND: Grant agreement No. 772193, to A.F.).

7. REFERENCES

- R.L. Fantz, "Pattern vision in young infants". The Psychological Record, 8:43 (1958)
- [2] R.L. Fantz, "The origin of form perception". Scientific American, 1;204(5):66-73 (1961).
- [3] R.J. Adams, M.L. Courage, M.E. Mercer, "Systematic measurement of human neonatal color vision". Vision Research, Jul 1;34(13):1691-701 (1994).
- [4] D.Y. Teller. "Spatial and temporal aspects of infant color vision". Vision Research, Nov 1;38(21):3275-82, (1998)
- [5] K. Knoblauch, F. Vital-Durand, J.L. Barbur, "Variation of chromatic sensitivity across the life span". Vision Research, Jan 1;41(1):23-36 (2001).
- [6] J. Maule, A.E. Skelton, A. Franklin, "The Development of Color Perception and Cognition". Annual Review of Psychology, Aug 16;74 (2022)
- [7] T. Wilcox, "Object individuation: Infants' use of shape, size, pattern, and color". Cognition, Sep 30;72(2):125-66 (1999)
- [8] A. Kimura, Y. Wada, J. Yang, Y. Otsuka, I. Dan, T. Masuda, S. Kanazawa, M.K. Yamaguchi, "Infants' recognition of objects using canonical color", Journal of Experimental Child Psychology. Mar 1;105(3):256-63 (2010)
- [9] J. Yang, S. Kanazawa, M.K. Yamaguchi, "Perception of Munker–White illusion in 4–8-month-old infants". Infant Behavior and Development, Dec 1;33(4):589-95 (2010).
- [10] J. Maule, A.E. Skelton, A. Franklin A, "The Development of Color Perception and Cognition". Annual Review of Psychology, Aug 16;74 (2022)
- [11] J. Maule, A. Franklin, "Color categorization in infants". Current Opinion in Behavioral Sciences, Dec 1;30:163-8 (2019)
- [12] J. Yang, S. Kanazawa, M. Yamaguchi, & I. Kuriki, "Cortical response to categorical color perception in infants investigated by near-infrared spectroscopy". Proceedings of the National Academy of Sciences, 113(9), 2370-2375 (2016)

- [13] A.E. Skelton, G. Catchpole, J.T. Abbott, J.M. Bosten, A. Franklin, "Biological origins of color categorization". Proceedings of the National Academy of Sciences, May 23;114(21):5545-50 (2017).
- [14] A.E. Skelton, A. Franklin, "Infants look longer at colours that adults like when colours are highly saturated". Psychonomic Bulletin & Review, Feb;27:78-85 (2020).
- [15] A.E. Skelton AE, A. Franklin, J. Bosten, "Colour vision is aligned with natural scene statistics at 4-months of age". bioRxiv, 2022-06. (2022).
- [16] J.M. Bosten, R.D. Beer, D.I. MacLeod, "What is white?" Journal of vision, Dec 1;15(16):5 (2015).
- [17] C. Houston-Price, S. Nakai, "Distinguishing novelty and familiarity effects in infant preference procedures". Infant and Child Development: An International Journal of Research and Practice, Dec;13(4):341-8. (2004)
- [18] T. Göksun, A. Kranjec, A. Chatterjee, "The development of visual art preferences". Proceedings of the 23rd International Association of Empirical Aesthetics, New York, NY (2014).
- [19] F. Damon, H. Mottier, D. Méary, O. Pascalis, "A review of attractiveness preferences in infancy: From faces to objects". Adaptive Human Behavior and Physiology, Dec;3:321-36 (2017)
- [20] Helène Mottier, "Arts visuels et cognition : Développement visuel et formation du jugement esthétique". Psychologie. Université Grenoble Alpes. Français. NNT : 2020GRALS019 (2020)
- [21] T. Cacchione, W. Möhring, E. Bertin, "What is it about Picasso? Infants' categorical and discriminatory abilities in the visual arts". Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts, Nov;5(4):370 (2011)
- [22] U.C. Krentz, R.K. Earl, "The baby as beholder: Adults and infants have common preferences for original art". Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts, May;7(2):181 (2013)
- [23] P. McAdams, M. Chambers, Bosten, J., Skelton, A. & A. Franklin, "Chromatic and spatial image statistics predict infants' visual preferences and adults' aesthetic preferences for art," unpublished study.
- [24] G. Mather, "Aesthetic image statistics vary with artistic genre". Vision, Feb 1;4(1):10 (2020)
- [25] A.M. Norcia, C.W. Tyler, R.D. Hamer, "Development of contrast sensitivity in the human infant". Vision research, Jan 1;30(10):1475-86 (1990).
- [26] C. Kidd, S.T. Piantadosi, R.N. Aslin, "The Goldilocks effect: Human infants allocate attention to visual sequences that are neither too simple nor too complex". PloS one, May 23;7(5):e36399, 2012.
- [27] P. McAdams, M. Chambers, A Skelton, A Franklin, "It's not so black and white: infants look longer at chromatic than achromatic patterns", unpublished study.

Pepperを使用したテレイグジスタンスロボットの色による

情動表現の開発 Development of Emotional Expression by Color for a Telexistence Robot using Pepper

> <u>大海 悠太,</u> 木俣 雄介, 仲野 匠, 辛 徳 <u>Yuta Ogai</u>, Yusuke Kimata, Takumi Nakano, and Duk Shin

東京工芸大学、243-0297 神奈川県厚木市飯山南5-45-1 5-45-1 liyama Minami, Atsugi-shi, Kanagawa 243-0297, Japan

概要

テレイグジスタンスロボットに情動表現を持た せるため、YOLOとCATRについてIAPS画像との対 応関係を調べ、Pepperと連携して色などを変化させ るシステムを構築した。また、Pepperをテレイグジ スタンスロボットとして改良し、動作実験を行なっ た。

1. はじめに

アフターコロナにおいて、オンラインとオフライ ンを混ぜたハイブリッド環境の重要性が注目され ている。テレイグジスタンスロボットの利用が考え られるが、操縦者の全ての身体表現を伝えるのは難 しい。IAPS(国際情動写真集)[1]は心理実験などに 広く用いられており、人間が写真を見て感じる情動 についての知見が蓄えられている。この知見を生か し、ロボットがカメラ入力に対して物体検出をした 結果への反応をデザインすることで、ロボットが情 動を持っているかのように振る舞わせることがで きるのではないかと考えている。そして、テレイグ ジスタンスロボットを使用する際に、ユーザーが即 座にコントロールできない感情的な反応を即座に 出せるようになると期待している。

IAPS 画像データと、物体認識アルゴリズム YOLO[2] 及びキャプション生成アルゴリズム CATR[3]の対応関係を調べることで、ロボットの情 動反応設計への利用可能性を調べる[4][5]。また、 Pepperロボットへの搭載方法について検討を行う。

Pepperロボットを遠隔操作し、展示物の閲覧、及 び画像データからの自動情動表現を色を用いて行 うシステムを開発する。

2. 方法

2.1 IAPSとYOLOとの傾向調査

IAPSの721枚の画像に対して、YOLOv4による物体 検出結果を取得し結果の傾向を調べる。YOLOv4は事 前学習済みのデフォルトのものを用いる。IAPS で は"man"、"woman"といった人間の姿が区別して ラベルに記載されているが、YOLO では手足などのパ ーツであっても"person"として検出される。そこで、一致しているかどうかの整合性を調べるための テーブルを作成し、傾向を調べた。

2.2 IAPSとCATRとの傾向調査

IAPSデータ中、721枚の画像に対して、CATR(2021 年5月22日版)によるキャプション生成結果の傾向 を調べた。CATRは事前学習済みのデフォルトのもの を用いる。傾向は著者が主観的に「ほぼ完璧に説明 できている」「一部説明できている」「説明できて いない」の3段階で評価した。評価の軸としては、" キャプション内の単語と画像内容が一致している" と"関係ない単語が含まれていない"というよう にしている。



Fig. 1 Pepper robot with 360-degree camera.

2.3 PepperとYOLO、CATRの連携

Pepperのカメラから画像を取得し、YOLOとCATR にかけて物体検出とキャプション生成を行う。検 出した物体を高い順に並び変え、Pepperで物体名 を信頼度の高い順に読み上げる。色について書 く。

2.4 Pepperのテレイグジスタンスロボット化

Pepperの頭上にInsta360air全方位カメラを装着 し、カメラと接続したGoogle Pixcel2をPepperの脚 部に取り付けた(図1)。またPCのキーボード入力に より、前後移動と回転移動をできるようなCUIイン ターフェースを構築した。PCとPepperはWifiで接続 されている。Google Pixcel2からYouTube Liveに360 度映像を送る。

PC上で移動命令を送ってから、YouTube Liveの映 像内でPepperが動き出すまでの時間の計測を10 回 行い、遅延時間を求めた。また、実験参加者4名に YouTube Liveの画面を見ながら、Pepperに5m直進さ せてから右90度旋回させ、また5m直進させてから戻 ってくるという往復20mのコースの操縦をさせた。

3. 結果·考察

3.1 IAPSとYOLOとの傾向調査

IAPS画像721枚についてYOLOv4で物体検出させた ところ、616 枚で物体を検出できた。1枚の画像の中 で最も信頼度の高い物体について、信頼度0.7 以上 は459 枚であり大半が正答していた。情動反応設計 の元としては十分に有用であると考える。

検出結果からIAPSとYOLOのラベルの対応関係を 目視で確認し、ラベルテーブルを作成した。これに よりYOLOで検出した結果から、どのIAPSラベルが対 応しているかを求めることができる。

3.2 IAPSとCATRとの傾向調査

721枚の画像に生成されたキャプションを評価した結果を図5に示す。「ほぼ完璧に説明できている」のは221枚、「一部説明できている」のは249枚、「説明できていない」のは251枚だった。そのまま利用するには誤検出が多くなる恐れがあると言える。CATRはオプションにv1, v2, v3を付けることで、異なるバージョンの出力を得ることができる。それらの出力で共通する名詞を用いるなどすることで、精度を向上させられると考えている。また、YOLOと同じ画像を入力させた場合の比較では風景画像についてはYOLOよりも有用な出力を出す傾向が見られた。

3.3 PepperとYOLO、CATRの連携確認

PepperとYOLO、CATRを連携するスクリプトを作成 し、Pepperのカメラ画像に対し自動的に物体検出と キャプション生成をできるようになった。また、そ の結果によってPepperの色や動きを変化させるこ とができた。

3.4 Pepperのテレイグジスタンスロボット化

PC上でPepperに移動命令を送ってから、YouTube Liveの映像が動き出すまでの平均時間は6.57秒で あった。また、実験参加者4名にPepperをYouTube Liveを閲覧しながら遠隔操作をさせたところ、往復20mのコースを平均5分54秒で移動させることができた。映像は荒く遅延も大きいが、Pepperの操作自体は可能なことは示せたといえる。

図2に示すようなメディアアート作品をPepperで 体験するシステムを構築しており、この研究発表当 日にデモを行う。



Fig. 2 Pepper robot with a media art.

4. まとめ

YOLOとCATRについてIAPS画像との対応関係を 調べ、Pepperと連携して色などを変化させるシステ ムを構築した。Pepperをテレイグジスタンスロボッ トとして改良し、動作実験を行なった。

5. 参考文献

- Lang, P.J., Bradley, M.M., & Cuthbert, B.N., "International affective picture system (IAPS): Affective ratings of pictures and instruction manual". Technical Report A-8. University of Florida, Gainesville, FL. (2008).
- [2] Bochkovskiy A., Wang, C., & Liao, H. M.: YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection, arXiv:2004.10934 (2020)
- [3] CA:TR: Image Captioning with Transformers, https://github.com/saahiluppal/catr, Accessed 2022-12-20.
- [4] 木俣 雄介, 辛徳, 大海 悠太, "IAPSと物体検出アルゴ リズムによるロボットの情動反応設計の検討", 人工 知能学会全国大会論文集(JSAI2022), 4Yin245-4Yin245 (2022).
- [5] Yusuke Kimata, Duk Shin, Yuta Ogai, "A Study of Robots' Emotional Expressions Using IAPS, an Object Detection Algorithm, and a Caption Generation Algorithm", Proceedings of The Twenty-Eighth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2023 (AROB 28th 2023), pp.117-120, (2023).

顔色解析による健康可視化とスマートミラーへの実装

Visualizing health status using face color analysis and its application to smart mirrors

森山 剛* 高橋伸弥(福岡大学)** 小野博(中央大学)*** 綱島宣浩(株式会社ティービーアイ)**** Tsuyoshi Moriyama, Shinya Takahashi (Fukuoka Univ.), Hiroshi Ono (Chuo Univ.), Nobuhiro Tsunashima (TB-eye Ltd.)

* 東京工芸大学、243-0297 神奈川県厚木市飯山南5-45-1 ** 福岡大学、814-0133 福岡県福岡市城南区七隈8-19-1 *** 中央大学、112-8551 東京都文京区春日1-13-27 **** 株式会社ティービーアイ、135-0016 東京都江東区東陽3-7-13

概要

人生100年時代に不可欠な健康寿命延伸のために、 疾病の発生を未然に防ぐ一次予防は喫緊の課題であ る。そして、健康に関心の薄い人々で一次予防を実現 するには非接触で非侵襲、無装着、無拘束かつ安価で 簡便、入手可能な手段で、日常生活を全く変更すること なく健康を可視化する技術が求められる。本研究では、 人が朝晩必ず鏡に向かう場面を想定し、ハーフミラー裏 面にカメラや生体センサーを有するデバイスを実現させ るための基礎的検討を行った。

1. はじめに

健康への意識が低い人でも健康状態を毎日観測す るためには、安価かつ簡易で、非侵襲、無装着、無 拘束な手段が、通常の生活のサイクルにおいて自然 に実施できる必要がある。そのような技術を目指し て、コンピュータの内蔵 Web カメラで顔を撮影し、 得られた画像中の皮膚の色を解析することにより脈 波成分を抽出する手法が提案されている[1]。しかし コンピュータを毎日開いて顔を撮影するのは手間が かかり現実的ではなかった。一方で、近年ハーフミ ラーの背面にカメラやセンサーを搭載し、一見通常 の鏡でありながら、鏡に正対する人物の情報を取得 したり、その人物の情報と共に気温等の情報を表示 したりするデバイス (スマートミラーと呼ばれる) が提案されている。そこで、スマートミラーを日常 生活に取り入れることによって、毎日の健康状態観 測に役立つと考えられる。

2. 健康状態の観測

2.1 顔に現れる健康状態

スマートミラー越しにカメラで人物を撮影することで顔 画像を取得する。顔面の皮膚は多層構造(表皮、真皮、 皮下組織)を有し、その皮膚表面色(RGB値)は、表皮 に分布するメラニン色素や真皮に分布するヘモグロビ ン色素によって作られる。これに室内照明光の成分や

撮像系のノイズが混ざり合ったものが顔画像信号となる。 そしてヘモグロビン色素の量を周期的に変化させる心 拍周期は、血圧や呼吸、情動に連動してそれぞれ異な る周波数帯域で変動していることが知られている。そこ で、顔画像から得られるRGB値の時系列データから独 立成分分析を用いてヘモグロビン色素成分に由来する 信号成分(顔脈波と呼ばれる)を分離させる手法が提案 されている[2][3]。

2.2 ドップラーセンサーを用いた心拍計測

近年有望視されている非接触センサーに25GHz帯ミ リ波を用いたドップラーセンサー(ドップラー効果を応用 したアクティブセンサー)がある。体動と共に心拍により 微小変動する胸部の膨張収縮を捉え、信号帯域を制 限することにより心拍成分のみを捉えるもので、ミリ波の 性質から服や布団を透過することで人体の自然なセン シングが可能である。

3. 心拍計測に関する実験

2.1節で述べた顔脈波検出法ならびに2.2節のドッ プラーセンサーを用いた心拍検出に関する実験を 行った。

3.1 顔脈波検出



図 1



(b) 顔部品座標に基づ (背面にカメラ) く頬領域抽出 人物の頬領域検出



図2 顔色解析による脈拍数算出





(b) パワースペクトル密度関数とピーク範囲

図3 独立成分とそのパワースペクトル密度関数

図1(a)のようにスマートミラー越しに撮影され る各カメラ画像から図2の流れで顔領域を検出し、 顔部品の特徴点座標から決まる頬領域(図1(b)の緑 の矩形)内部でRGB平均値の時間信号を算出した。 これを独立成分分析した結果を図3(a)に、これらの パワースペクトル密度関数を図3(b)に示す(第1~ 3成分を赤緑青で示す)。健康な成人の安静時の脈



図4 胸部に正対させるドップラーセンサー

拍数は約60~100回であり[4]、1.0~1.7Hzの周波数範 囲で検出されるピークから脈拍数を算出した結果、 第3成分がオムロン上腕式血圧計 HCR 7106で計測 された心拍数の真値に最も近い結果となった。

3.2 平静時と運動後の比較

被験者6人に、安静時とエアロバイクを80rpmで 3分間こがせた運動後に、スマートミラー越しの顔 を20秒間撮影し顔画像を取得した。これに対し本手 法で求めた脈拍数を評価したところやはり第3成 分で真値との相関係数が0.44となり、心拍数の増減 にほぼ追従する結果となることを確認した。

3.3 ドップラーセンサーによる心拍計測の結果

図4のようにカレアコーポレーションのセンサ ーを胸部に正対させ計測したところ、検出閾値の設 定に依存して絶対値の信頼性は低かったが、平静時 から運動時に上昇する心拍数の変動に追従する結 果となった。

4. まとめと今後の課題

健康可視化に向け、スマートミラー越しに通常のカメ ラを用いて撮影された顔画像から脈拍数を検出する手 法を実装した。今後、別途検討している音声インタフェ ースと共に生活の中で実験を行っていく。

参考文献

- Ming-Zher Poh, Daniel J. McDuff, and Rosalind W. Picard, Advancements in Noncontact, Multiparameter Physiological Measurements Using a Webcam, IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, 58(1), JANUARY 2011.
- [2] 安丸昌輝, 横山怜太, 程正雪, 金井謙治, 甲藤二郎, 4K 顔画像を活用した非接触心拍推定法の精度評価, 情 報処理学会研究報告, 2018-AVM-103(20), 2018.
- [3] 津村徳道, RGB カメラにより撮影された動画像に基 づく非接触心拍計測による情動工学とその応用,オ レオサイエンス, 21(5):159-166, 2021.
- [4] e-ヘルスネット,心拍数, https://www.e-healthnet.mhlw.go.jp/information/dicti onary/exercise/ys-032.html

筋シナジー情報による筋活動のカラー化 Muscle activity visualization with color using muscle synergy information

<u>神原裕行</u>, 辛徳, 姜有宣 Hiroyuki Kambara, Duk Shin, Yousun Kang

東京工芸大学、243-0297 神奈川県厚木市飯山南5-45-1

概要

本研究では、運動中の筋活動を色情報を用いて可 視化することを目的としたシステムの開発を行なった. 具体的には、手首関節運動中の筋活動データに内在 する、筋シナジーと呼ばれる複数の筋の協調的な活動 情報を抽出するとともに、各筋シナジーの活動強度を RGBカラーモデルの各要素の値へとマッピングすること で、手首の運動方向に応じた筋活動の変化を色情報と して可視化することを実現した.

1. はじめに

今後の超高齢化社会においては,運動機能の維持 やリハビリテーションを目的とした運動トレーニングを自 宅で気軽に行えることが望まれる. 運動を評価・サポー トする専門家が不在の自宅においてトレーニング効果 を向上させるためには,運動中の筋活動を解析し適切 な筋活動をフィードバックするシステムが重要となる.現 在のところ、筋活動を皮膚の上から安全に計測できる表 面筋電計が比較的安価に販売されている.一方,計測 した筋活動を患者にどのようにフィードバックすれば良 いかという点は、依然として難しい問題と言える. その理 由としては、1)普段の運動時は筋肉の活動を意識する ことはないため、数値やグラフで表示された筋活動を直 感的に把握することは難しいこと,2)身体動作は複数の 筋肉の協調的な活動により成立しているため,一本一 本の筋肉ごとの筋活動を表示されたとしても、それぞれ を独立に調整することが難しいことが挙げられる.

本研究では、筋シナジーと呼ばれる複数の筋肉の協 調的な活動を,数値やグラフではなく色の変化としてフ ィードバックすることで筋活動の直感的な知覚を促進す るシステムの開発を目指す.特に本稿では,手首関節 の運動中の筋活動の可視化システムの開発を目指して 行なった,手首の筋肉群に存在する筋シナジーの数を 検討するシミュレーション実験,および,実際の手首関 節運動中の筋活動から筋シナジーを抽出する計測実 験の結果について報告する.

2. 筋シナジーによる筋活動のカラー化システム

2.1 筋シナジーとは

人の身体には数百にも及ぶ筋肉が存在している.一 方,脳が身体運動を生成する際には,筋肉一本一本を 独立に調節するのではなく,筋シナジーと呼ばれる複 数の筋肉群に内在する協調構造を利用している可能性 が示唆されている.実際,多くの計測実験により,様々 な運動中の筋活動パターンが,下記の式(1)のように, 数個の筋シナジーの基底ベクトルの線形和として再現 できることが報告されている[1].

$$\boldsymbol{m}(t) = \sum_{i=1}^{N} c_i(t) \, \boldsymbol{w}_i \tag{1}$$

ただし, $m(t) \in \mathbb{R}^{M}$ は時刻tにおけるM個の筋肉の活動 度, $c_i(t) \in \mathbb{R}$ は時刻tにおけるi番目のシナジーの活動 強度, $w_i \in \mathbb{R}^{M}$ はM個の筋肉に対するi番目のシナジー の基底ベクトル, Nはシナジーの個数を表す. なお, シ ナジーの個数Nは筋肉の個数Mよりも小さい数となる.

2.2 筋活動のカラー化システム

本研究では、複数の筋シナジーの活動強度を、RGB、 HSV、CMYKなどのカラーモデルで表現される色情報と して可視化するシステムを構築する(図1).このシステ ムでは、まず、筋電センサーを皮膚上に装着し、筋活動 の大きさに応じて変化する表面筋電位を計測する.次 に計測された表面筋電信号の時系列パターン(m(t)) に非負値行列因子分解を適用することで、筋シナジー の基底(w_i)と活動強度($c_i(t)$)を求める.そして、各筋 シナジーの活動強度をカラーモデルの各成分の値とす ることで色情報へと変換する.



図1 筋シナジーによる筋活動のカラー化 (RGB カラーモデルを用いた場合の例)

3. 最適化シミュレーションによる手首の筋シナジ 一数の検討

前章で提案したシステムを用いて筋活動を色情報へ と変換する場合,全体の筋活動をいくつの筋シナジー に分解するかを事前に決める必要がある.そこで,手首 の屈曲・伸展と尺屈・橈屈の2自由度の関節運動中に, 手首関節に作用する5つの筋肉(長橈側手根伸筋,短 橈側手根伸筋,尺側手根伸筋,尺側手根屈筋,橈側 手根屈筋)が最適な活動を行なっていると仮定した場 合に、いくつの筋シナジーを用いることで全体の筋活動 が再現できるかを検討する.

まず,最適な筋活動を求めるために,上述の2自由度 を有する手首関節と5つの筋肉からなる筋骨格モデル, および,手首の関節運動を実現するための最適な筋活 動を求めることができる運動制御モデル[2]を用いた計 算機シミュレーションを行なった.次に,シミュレーション により求められた5つの筋肉の時系列の筋活動データ に対して非負値行列因子分解を適用した.その際に, 筋シナジーの数,つまり,因子のランクを1から5まで変 化させ,筋肉の個数よりも少ない筋シナジーの線形和 によって,元の筋活動データをどの程度で再現できて いるかを決定係数R²により検証した(図2).その結果, 3つの筋シナジーにより,決定係数0.9以上の高い値で, 元の筋活動を再現できることがわかった.



4. 手首関節運動中の筋シナジーの抽出とカラー化

4.1 手首の筋活動の計測実験

実際の筋活動データから筋シナジーの抽出が行える かを検証するため、手首の関節運動中の筋活動を計測 および解析する実験を行なった.関節運動の自由度や 筋活動を計測する筋肉は、3章のシミュレーション実験 と同様とする.また、各筋肉の筋活動データは、Delsys 社製の表面筋電計測装置Bagnoli-16により計測した. また、計測した表面筋電信号の時系列データの前処理 として、全波正流、正規化、ローパスフィルタ(カットオフ 周波数2.2Hz)を行なった後、非負値行列因子分解を適 用した.なお、因子分解のランクは前述のシミュレーショ ン実験の結果を参考として3とした(つまり、3つの筋シ ナジーを抽出した).

4.2 抽出された筋シナジーによる筋活動の再現

図3に,前処理前後の筋活動と3つの筋シナジーの 線形和として再現された筋活動の時系列データを表示 する.ここでは,例として橈側手根屈筋のデータを表示 した.図より,元の筋活動データが筋シナジーにより精 度良く再現できていることがわかる.なお,5つの筋肉全 ての筋活動データを再現した際の決定係数は0.96とな



図4 筋シナジーの活動強度と対応する色情報

り、実際の手首関節運動中の筋活動パターンも3つの 筋シナジーで説明できることが示唆された.

4.3 筋シナジー活動強度を用いた筋活動のカラー化

2章で記述した方法を用いて, 筋活動をカラー化した 結果を図4に示す.ここでは, シナジー1, 2, 3の活動強 度を, R, G, Bの値に対応させた.図より, 手首の運動 方向に応じて, 筋活動の色が変化する様子がわかる.

5. まとめと今後

本研究では、手首の関節運動中の表面筋電信号から筋シナジーと呼ばれる複数の筋肉の協調的な活度を 抽出するとともに、筋シナジーの活動強度をRGBカラー モデルにより色情報へとシステムの開発を行なった. 今 後は、このシステムの有効性を検証するための評価実 験を行う予定である.

6. 参考文献

- M.C. Tresch, A. Jarc: Curr. Opin. Neurobiol. 19(6), 601-7(2009).
- [2] H. Kambara, D. Shin, Y. Koike: J. Neurophysiol. 109(8), 2145-60(2013).

フォトグラメトリーによって作成した3Dモデリングとインデックス マッピングを含むフルカラー3D造形 Full color 3D modeling including 3D modeling and index mapping created by

photogrammetry 内田孝幸

Takayuki Uchida

東京工芸大学、243-0297 神奈川県厚木市飯山南5-45-1

概要

多視点画像からの3D構築の技術は最近ではフォトグ ラメトリーと言われ、地形、建築物、人などを3D化する 新しい技術として注目を集めている。ここではゴルフ場 において撮影を行い3Dモデルを構築した。さらに植生 の状態を反映する正規化差分植生指数(NDVI)をマッ ピングし、そのインデックスマッピングの3Dモデルを造 形出力した。さらに、別途、人工衛星から得られる可視 光画像ならびに、NDVI画像と比較検討した。

1. はじめに

UAV(無人航空機、通称ドローン)の飛行性能化なら びに、それらに関わるカメラや映像取得・転送、測位の 技術の進展はめざましい。フォトグラメトリーは古くは「写 真測量」という意味であったが、最近では「多視点画像 からの3D構築」という意味に変わってきている。この技 術はSfMやPCの能力の向上とも相まって、社会での 様々な期待が向けられている。これらは、荷物の輸送の みならず、インフラ点検や、測量、文化財のアーカイブ スなど多岐に渡っている。さらに、UAVにマルチスペクト ルカメラを搭載することで、人には通常見えない位置か ら、人の目(可視光領域)では、検出し難いものを抽出 し明瞭に示すインデックスマッピングの応用も広まりつ つある。ここでは、UAVからのデータと人工衛星からの それぞれのデータから作成したインデックスマッピング の比較を行い、そのハイブリッド運用の利点について調 べた。また、一部についてはインデックスマッピングの 3Dモデル化について検討した。

2. 実験

UAV の画像取得では、東京工芸大学の厚木キャン パス近くにある本厚木カンツリークラブのゴルフ場の休 場日にて行った。UAV はP4 Multispectral (以下P4M) を用い、撮影領域に対して飛行経路を予め設定し、必 要な画像を撮影・飛行するミッション飛行をiPad 用のア プリケーションソフトDJI GS pro を用いて行った。

飛行においては前述した自動飛行・撮影モードで撮 影を行い、データを取得した。得られた画像群をSfMの 一つであるMetaShapeを用いて点群、クラウド、メッシュ、 テクスチャ構築を経て3Dモデルを構築した。 ここでは、芝や樹木の植生の状態の観察を目的とし て、マルチスペクトルカメラを搭載したP4Mを用いている。 搭載したカメラは6つの帯域のカメラ(Vis, R, G, B, RE, NIR)を有している。得られたデータは、Pix4D_Fieldsな らびにMetaShapeを用いて、オルソ画像化およびインデ ックスマッピングを行った。インデックスマッピングでは、 NDVIによって、その植生の状況を調べた。なお、NDVI は(NIR-R)/(NIR+R)から求めた。NDVIについて はUAV測定だけでなく、Pix4D_Fields ver.2で利用可能 となった衛星のSentinel-2Aから得られたものとの比較を 行った。

3. 結果

Fig.1(a) にゴルフ場の10番ホールの撮影の様子の一 例を示す。ここでは、グリーン側からクラブハウスを眺め た様子であり、右に曲がっている形状となっている。この コース全体を上述のミッション飛行によって、撮影を行 い、得られた画像群をSfMソフトウェアによって、3D モ デルを構築した。その3Dデータを使って、さらに紙積層 型フルカラー3Dプリンタで出力したものをFig.1(b) に示 す。



Fig.1 Visual light images of the Hon Atsugi Country Club, Golf Course No. 10, taken by satellite and UAV, respectively. (a) Satellite (Sentinel-2) image, (b) UAV (P4M) image.

1cm

さらに、NDVIのインデックスマッピングを行った。ここでは、植生な良好な状態を緑色に、植生が不良もしくは無機物には赤色になるように、カラーアサインした。通常これらは、2D表示される場合がほとんどであるが、ここでは、3D化してさらに、紙積層型フルカラー3Dプリンタで造形した¹⁻³)。結果をFig,1(c)に示す。



Fig.2 Visual light images of the Hon Atsugi Country Club, Golf Course No. 10, taken by satellite and UAV, respectively. (a) Satellite (Sentinel-2) image, (b) UAV (P4M) image.



Fig.3 NDVI images of the Hon Atsugi Country Club, Golf Course No. 10, taken by satellite and UAV, respectively. (a) Satellite (Sentinel-2) image, (b) UAV (P4M) image.

次に衛星画像とUAVで撮影し、オルソ画像化したもの をFig.2 (a), (b)にそれぞれ示す。解像度は異なるものの、 対象となる部分(ここでは10番ホール)の対応が取れて いることが分かる。そこで、この部分のNDVIを比較した、 ものをFig.3 (a), (b)に示す。また、インデックスのカラー アサインを図の下に、ヒストグラムとして付記した。この場 合、緑を植生が良好、赤を植生が不良(もしくは無機 物)としている。可視光画像の場合と同様、NDVIにお いても、その対応、例えば、コースを分ける樹木、グリー ン、バンカーなどの対応が取れていることが分かる。人 工衛星からの画像・NDVIは、一部天候の問題はあるが、 恒常的にデータを取得、ストレージしているため、時間・ 日数変化に対する系統的な変化を追うことが可能であ る。UAVから取得するデータと比較して、解像度は低い が、これらを双方でハイブリッドに運用し検証することで、 より正しい植生の変化を追うことが可能となる。

4. まとめ

フォトグラメトリーの技術的要素である多視点からの画像取得にドローンを使用した。その画像をもとに、SfMでゴルフ場の10番コースの3Dモデルを構築した。さらに、3Dモデルのデジタルデータをもとに、紙を積層したフルカラー3Dプリンタでこれらのモデルを造形した。一般に3Dプリント材料はプラスチックのフィラメントを用いる場合が多いが、最近のSDG sの一部や環境負荷の軽減の観点⁴⁾から、紙の有用性が見直されており、今後の発展が期待される。さらに、植生の状態を示すNDVIを人工衛星から取得したデータとドローンで撮影したデータで比較し、ハイブリッド運用の有効性を示した。

5. 参考文献

- 1) Ekelund, Daniel Ihlen: Master thesis of NTNU (2015)
- 2) 内田孝幸,美田翼,久原泰雄,東吉彦,日本印刷学 会論文誌,第59卷,第4号,pp.28-33 (2022).
- 内田孝幸,小嶋優輝,行谷時男,小林信一,安田洋司,越地福朗,高橋章浩,日本写真学会誌 86 巻1号(2023 年,令5), in press.
- 4) 環境省,プラスチック資源循環法関連
- https://www.env.go.jp/recycle/plastic/circulation.html, Accessed online on January 31, 2023.

外観デザインと調和する透明アンテナ

Transparent antennas matching with the surrounding appearance and design

越地 福朗,安田 洋司,山田 勝実, 内田 孝幸 Fukuro Koshiji, Yoji Yasuda, Katsumi, Yamada Katsumi and Takayuki Uchida

東京工芸大学、243-0297 神奈川県厚木市飯山南5-45-1

概要

本研究では、ITO/Ag/ITO積層複合透明導電膜を用いるモノポールアンテナの提案・検討を行った.その結果,成膜したITO (300 nm)/Ag (5 nm)/ITO (30 nm)を用いたモノポールアンテナにおいて、76.7 %の光学的透過率と81.4 %の放射効率が得られ、高い放射効率と高い光学的透明性を両立できることを示した.特に、試作アンテナによって得られた80%以上の放射効率は、携帯機器やウェアラブル機器に内蔵される小形アンテナと同等であり実用的であるといえる.

1. はじめに

近年,スマートシティの実現に向けて, Internet of Things (IoT)や第5世代移動通信システム(5G)に関す る研究開発が進められている.これらの通信システムに おいては,通信特性向上のために,アレーアンテナが 利用される.また,アンテナの放射特性を確保する観点 から,アンテナ設置場所は機器筐体内部よりも筐体表 面が望まれる.こうした背景から,透明導電膜を利用す る透明アンテナが検討されている[1]. これまでに透明 導電膜として, Indium Tin Oxide (ITO)などの透明導電 材料が検討されているが、ITOなどの単一材料で構成 された透過率80%程度の透明導電膜を用いたアンテナ の放射効率は30%~50%程度であり、高い放射効率が 得られない.一方で、金や銀などの導電率の高い金属 薄膜をITOなどの誘電体薄膜でサンドイッチするような、 誘電体-金属-誘電体(Dielectric-Metal-Dielectric; DMD)構造の積層膜によって、光学的透明性と高導電 率を両立できることが報告されている.しかしながら, DMD膜をアンテナとして応用する研究はほとんど見当 たらない. 本研究では, DMD構造を導入したモノポー ルアンテナを提案・検討する[2].

2. ITO/Ag/ITO透明導電膜の成膜

本研究では、DMD膜として、0.7 mm の無アルカリガ ラス基板上に、ITO膜300 nm、Ag膜5 nm、およびITO膜 30 nmを成膜する.ITO膜およびAg膜は、対向ターゲッ ト式スパッタ装置を用いて堆積する.基板温度は室温、 スパッタガス圧は4 mTorrで、Arガス流量20 sccm、Ar + 10%O2ガス6 sccmをマスフローコントローラで制御し堆 積槽に導入する.スパッタ電流は500 mA一定であり、 ITOおよびAgの堆積速度はそれぞれ、80 nm/min、60 nm/minあった.



Table 1 Sheet resistance and conductivity

	ITO	ITO/Ag	DMD (ITO/Ag/ITO)
Sheet resistance R_s [Ω /sq]	5.2	4.7	3.4
Conductivity σ [S/m]	6.4×10^{5}	7.0 ×10 ⁵	8.8×10 ⁵

図1は、成膜した透明導電膜の可視光領域を含む 400 nm~700 nmの波長における透過率を示したもので ある.図1からわかるとおり、単層の300 nmのITO膜にお いては、82.3%の平均透過率が得られる.この単層ITO 膜の上に、5 nmのAgを堆積した二層のITO/Ag膜では、 Ag粒子による遮蔽のみならず、金属光沢にともなう反射 が顕著となり、平均透過率は59.7%に落ち込む.一方 で、ITO/Ag膜の上に、さらにITO膜を堆積した3層の DMD (ITO/Ag/ITO)膜では、ITO膜が反射防止 (AR) 層として機能し平均透過率は大幅に改善する.このとき、 最大透過率および平均透過率は、それぞれ76.7%、 74.0%である.

表1は、図1に示す各膜のシート抵抗、および導電率 をまとめたものである. 同表からわかるとおり、単層の ITO 膜では5.2 Ω /sq(6.4×10⁵ S/m)であったシート抵抗 が、ITO/Ag膜では4.7 Ω (7.0×10⁵ S/m) に低減され、 DMD膜では3.4 Ω /sq(8.8×10⁵ S/m) へとさらに低減さ れる.

図2は, (a) 単層 ITO 膜, (b)2層 ITO/Ag 膜の Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) 画像



(a) Single-layer (ITO)(b) Double-layer (ITO/Ag)Fig. 2 FESEM image of Ag intermediate layer

を示したものである. 同図(a)からわかるとおり,ドメイン の分かれたITO特有の膜が観察される. 同図(b)からわ かるとおり, ITO膜上に, Ag粒子が, ランダムに多数の 穴が空いた状態で, 薄く堆積している.

3. 試作アンテナと放射特性

図3(a)は、DMDを用いて試作したアンテナの写真で ある. 放射素子長 20 mm,幅 5 mm,グラウンド導体幅 80 mm,給電点の間隔0.5 mmとしている.透明導電膜 の厚さは、図1で成膜したものと同様であり、単層ITOで は300 nm,3層DMD(ITO/Ag/ITO)では335 nmである. 図3(b)は、試作アンテナの反射特性S₁₁である.同図か らわかるとおり、試作アンテナは、3.2 GHzで共振し、ア ンテナとして動作していることがわかる.また、同図(c)は、 試作アンテナの3.2 GHzにおける放射パターンである. 同図からわかるとおり、xy面において水平面内無指向 性、zx面においては8の字のモノポールアンテナ特有 の放射パターンが得られており、良好な放射特性が得 られているといえる.

表2は,試作アンテナの放射効率をWheeler法によっ て測定した結果を示したものである.同表からわかるよう に,単層ITO,2層ITO/Ag膜,3層DMD膜の放射効率 は,それぞれ,68.0%,75.5%,81.4%であった.単層 ITO膜の代わりに,DMD膜を用いることで,大幅に放射 効率が向上する.この80%の放射効率は,携帯機器や ウェアラブル機器に内蔵される小形アンテナの放射効 率と同等以上であり,良好な放射効率が得られていると いえる.

以上から, DMD透明導電膜を用いたアンテナは, 従 来課題であった透明性と放射効率を改善し, およそ 80%の光学的透過率と放射効率を同時に実現できるこ とが確認された.

4. まとめ

本研究では、ITO/Ag/ITO積層複合透明導電膜を用 いるモノポールアンテナの提案・検討を行った.その結 果,成膜したDMD膜,すなわち、ITO (300 nm)/Ag (5 nm)/ITO (30 nm)を用いたモノポールアンテナは、 76.7%の光学的透過率と81.4%の放射効率が得られた. 本研究で得られた81.4%の放射効率と76.7%の光学的 透過率は、高い放射効率と高い光学的透明性を両立 するアンテナの一例として有用である.特に、試作アン



(a) Prototyped antenna made on an experimental basis



Fig. 3 Prototyped antenna employing DMD

Tabl	le 2	Radiation	efficiency

	ITO	ITO/Ag	DMD (ITO/Ag/ITO)
Simulated [%]	73.0	78.2	83.2
Measured [%]	68.0	75.5	81.4

テナによって得られた80%以上の放射効率は,携帯機 器やウェアラブル機器に内蔵される小形アンテナと同 等であり実用的であるといえる.

参考文献

- [1] Y. Yamada, F. Koshiji, Y. Yasuda, T. Uchida, K. Yamada, and, et al., "Analysis of Reflection Characteristics and Radiation Efficiency on Thickness and Conductivity of Monopole Antenna Using Transparent Conductive Film", ICEP 2021, Online, Japan, May 2021.
- [2] F. Koshiji, Y. Yasuda, Y. Yamada, K. Yamada, and T. Uchida, "Transparent antenna with high radiation efficiency and high optical transmittance using dielectric-metal-dielectric composite materials based on ITO/Ag/ITO multilayer film", Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol.15, pp.E22-001-1-7, July 2022.

再帰的矩形分割を使用した抽象画

Abstract Pictures Using Recursive Division of Rectangle

<u>久原泰雄</u> Yasuo Kuhara

東京工芸大学 164-8678 東京都中野区本町2-9-5 * 2-9-5 Hon-cho, Nakano-ku, Tokyo 164-8678, Japan

概要

本稿では、コンピュータ・グラフィックス作品であるAI Compositionについて述べる。AI Compositionは、矩形 を再帰的に分割し、三原色で着色することによって、自 己相似性を持つ抽象画をジェネラティブに生成する。さ らに、AI Compositionによって生成されたグラフィックス を立体構造物に対してプロジェクション・マッピングを行 う応用について述べる。

1. 抽象と具体

抽象と具体は真逆の意味を持つ。一般的に抽象的 な表現は分かりにくく、具体的な例を用いて説明すると 理解しやすくなる。しかし、抽象化とは個々の具体例か ら余計なものをそぎ落とし、普遍的な要素を抽出するこ とに他ならない。結果として個別性が失われ、現実から 遠ざかるため、何を表しているのか理解し難くなるが、あ る意味、普遍性を持つ表現に精錬されたともいえる。さ らには、一見、無関係に見える事象に共通項を見出し、 互いを関係付けることを可能にするため、抽象化された 概念は様々な分野に応用できる。例えば数学における 群論は高度に抽象化された体系であるが、あみだくじ、 代数方程式の解、正多角形の対称性などが同じ構造を 持つことを教えてくれる。

19世紀までの絵画では、主に風景、人物、静物といった具体的な対象が描かれた。これに対して、ポスト印象派の画家ポール・セザンヌは「自然を円筒、球、円錐で表す」と述べ、具体物を幾何学的な抽象物に還元することを提唱し、20世紀以降のキュビズムなどの抽象画の流れに影響を与えた。例えば、ピート・モンドリアンは平面を複数の矩形で構成し、シンプルな色彩で着色した抽象絵画Compositionを発表した。抽象画は、実在する具体物ではなく、点、線、面など抽象的な幾何学図形で平面を再構成することによって普遍性を追求した絵画といえる。本作品は、Compositionをヒントに、自動的に矩形を分割して画面を構成するシステムである。

2. 描画方法

2.1 再帰的呼び出しによる矩形分割

コンピュータ・グラフィックスでは、ピクセルという微小 な単位で画像を扱う。解像度が高いと対象を写実的に 表示し、解像度が低いと無機質な矩形の集まりとなる。 AI Compositionは、ディスプレイ画面を単なる一つの矩 形と捉え、繰り返し二分割し再構成する。また、矩形分 割には、再帰的呼出しを用いているため、描かれる画 像には、フラクタルでよく見られる自己相似性が現れる。 そのため自然界に多く見られるジェネラティブな表現が 得られる。

図1に再帰呼び出しを3回実行し、矩形を8分割した 例を示す。矩形の長辺側がランダムな比率で分割され ている。1回目の分割を黒色の1本の線分で、2回目の 分割を橙色の2本の線分で、3回目の分割を緑色の4本 の線分で示した。



Fig. 1 Division; 1st black, 2nd orange, 3rd green.

2.2 光による色彩

ディスプレイ・モニターやスクリーン・プロジェクション のように光と影で表現する場合、光の三原色として知ら れる赤、緑、青を基本として加法混色で描画されるため、 背景色は黒、矩形の塗りつぶし色は赤、緑、青とした。 矩形は一定の確率で3色のいずれかが選択され着色さ れる。3色の出現確率は同じ値である。また、色の彩度 は一定の確率で分散させ、変化を持たせている。

図2に、AI Compositionによって生成された絵画の例 を示す。2分割を14回繰り返しているため、2の14乗すな わち16,384個の矩形で構成される。再帰的な分割によ って自己相似性が見られる。AI Compositionは芸術学 部フェスタ2022に出展した[1][2]。



Fig. 2 AI Composition, 16384 division

2.3 絵の具による色彩

AI Composition Paintedは、紙面に塗料で描画する変 化型である。印刷など減法混色に基づく色の三原色は、 シアン、イエロー、マゼンタであるが、画材で絵画を描く 場合、絵の具の三原色として赤、青、黄が知られている。 実際、ピート・モンドリアン、ジョアン・ミロ、ディック・ブル ーナらは絵の具の三原色を好んで用いた。ディスプレイ の場合、黒の背景に光を重ねて描画するが、紙面の場 合、初期状態の白の背景に塗料を重ねて描画する。AI Composition Paintedでは、背景色として白、矩形の塗り つぶし色として絵の具の三原色である赤、青、黄を用い た。色の選択確率や彩度の調整は、AI Compositionと 同様である。図3にAI Composition Paintedよって生成さ れた絵画の例を示す。AI Composition Paintedは芸術世 界に掲載された[3]。



Fig. 3 AI Composition Painted, 16384 division

3. 立体構造物への投影

ガウディ建築の代表作であるバルセロナのサグラダ・ ファミリアは、特徴的な外観で知られているが、建物の 内部は光と色の芸術で表現されている。朝方、日が登 るに連れて、東の生誕のファサード側から太陽光が入り、 青系のステンドグラスを通して構内が染まる(図4参照)。 一方、午後は日が傾くに連れて、西の受難のファサード 側から太陽光が入り、赤系のステンドグラスを通して構 内が染まる(図5参照)。壁、天井、柱が天然のプロジェ クション・マッピングで装飾される。太陽の動きと共にゆ っくり変化する様子が極めて幻想的である。ステンドグラ スは、着色されたガラス片で構成されており、太陽光を 通して美しい色彩を醸し出す。AI Compositionは着色さ れた多数の矩形で構成されているため、立体構造物に 投影すればステンドグラスのような効果を生み出すこと が期待できる。今後、AI Compositionを立体構造物へ のプロジェクション・マッピングに応用していきたい。



Fig. 4 Blue stained glass and projection after sunrise



Fig. 5 Red stained glass and projection before sunset

4. 参考文献

- [1] Y. Kuhara, Al Composition, 芸術学部フェスタ2022図 録, p8 (2022).
- [2] Y. Kuhara, Al Composition Demo, The Faculty of Arts Festival, <u>https://youtu.be/F69mzVTf_KU</u> (2022).
- [3] Y. Kuhara, Al Composition Painted, 芸術世界, 東京工 芸大学芸術学部紀要第29号, pp77-83 (2023).



高精度干渉顕微鏡の開発 Development of a high precision interference microscope using SLD

<u>陳</u>軍,安田洋司,豊田光紀 CHEN Jun, YASUDA Yoji, TOYODA Mitsunori

東京工芸大学、243-0297 神奈川県厚木市飯山南5-45-1 Tokyo Polytechnic University, 5-45-1 liyama-Minami, Atsugi, Kanagawa 243-0297, Japan

概要

光導波路や生物試料のような微小で透明な位相物 体の高精度計測のため、スーパールミネッセントダイオ ード(SLD)を用いた透過型共通光路位相シフト干渉顕 微鏡を開発しました。共通光路位相シフト干渉顕微鏡 では、物体光と参照光がほぼ同じ光路を通過するため、 振動や空気揺らぎなどの影響をほとんど受けず、高安 定、高精度の位相計測が可能となります。しかし、レー ザ光のコヒーレントノイズがさらなる高精度化の障害とな っています。そこで、レーザとLEDの長所を併せ持つ SLDを用いることで、レーザの干渉性に起因するノイズ を大きく低減し、超高精度の測定を可能にしました。

1. はじめに

光導波路や生物細胞のような微小で透明な位相物 体の高精度計測はフォトニクスやバイオニクスの分野で 強く求められている。我々はバイプリズムやウォラストン プリズムの横移動を用いた共通位相シフト干渉顕微鏡 の研究に取り組んできた。^[1-3]このシステムでは干渉す る2光波がほぼ同じ光路を通過するため、振動や空気 ゆらぎなどの影響をほとんど受けない。また、必要な位 相シフトはプリズムの横移動で精密に導入できる。微小 な位相物体を高精度で計測できることから研究や生産 現場で応用されている。しかし、光源に用いるレーザの コヒーレンス長が長いため、コヒーレントノイズが問題と なっている。そこで、低コヒーレンス光源を用いる共通光 路位相シフト干渉顕微鏡を提案し、実験でその有効性 を確かめたので報告する。

2. 光学系と原理

2.1 光学系

低コヒーレンス光源を用いた透過型位相シフト干渉 顕微鏡の構成をFig 1に示す。これは透過型光学顕微 鏡の結像系にウォラストンプリズム(WP,分離角2°)を挿 入したもので、光源には広帯域のスーパールミネッセン トダイオード(SLD) (Thorlabs, SLD650T, 10mW,中心波 長640nm,半値幅5nm)を用いた。共振器構造を持つ半 導体レーザ(LD)と違って、SLDの活性層端面には反射 防止膜が施されていて、増幅された自然放出光がその まま出射し、干渉性の低い光となる。実験に用いたSLD のコヒーレンス長は約80µmである。一方、活性層のサイ ズはLDとほぼ同程度で、適度な空間コヒーレンスを有する。そのため、SLDは長いコヒーレンス長を必要としない共通光路干渉顕微鏡の光源に最適である。



Fig 1 Experimental setup

SLD からの光はコリメートレンズで平行光としたのち、 透過軸が 45°方向にセットされた偏光子を通過して被検 試料を照射する。このとき、被検試料を入射光の片側に 位置するように設定し、残りの片側は参照光として用い る。試料は無限遠補正の対物レンズ(20倍、NA0.4)と焦 点距離が 200mmの結像レンズでカメラの撮像面に結像 される。対物レンズを透過した光は WP によって偏光方 向が直交の 2 つの光に分割され、検光子を通過して干 渉する。干渉縞の強度分布は CCD カメラで検出され、 画像ボードを介してコンピューターに取り込まれる。干 渉縞の強度分布は

 $I(x, y; \delta_j) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi fx + \varphi(x, y) + \delta_j], (1)$ と表すことができる。ここで $a(x, y) \ge b(x, y)$ は干渉縞のバ イアスと振幅で、2πfx は干渉する2 光波の波面の傾きで、 δ_j は WP の横移動による位相シフトである。また、 $\varphi(x, y)$ は被検の位相分布で、厚さ t、屈折率分布 n(x, y)の試料の場合、

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} t \left[n(x, y) - n_r \right] , \qquad (2)$$

となる。ただし、n, は参照領域の屈折率である。位相 計測を行う際、ピエゾ素子でプリズムを横方向に移動さ せて位相シフトを導入する。2πの位相シフトを与えるた めの移動量は18.17μmである。4つの干渉縞画像を撮 像して計算機に取り込み、4-Step 位相導出アルゴリズ ム^[4]を用いて被検の位相分布を計算する。算出された 位相分布から波面の傾き成分を除去したのち、(2)式から被検の屈折率分布或いは膜厚 tを算出する。

干渉する2光波はほぼ同じ光路を通り外乱や振動に強い。また、位相シフトはプリズムの横方向移動によって 導入され、反射鏡の移動を用いた方法に比べ、同じ位 相シフトを与えるための移動量が 60 倍程度大きくなる。 このことからより精密な位相シフトを与えることができ、よ り高精度の位相計測が可能となる。

3 実験と実験結果

開発した干渉顕微鏡の性能を確かめるためいくつか の実験を行った。

3.1 干渉縞の鮮明度の比較

まずSLDとHe-Neレーザを用いたときの干渉縞を比較 した。SLDとHe-Neレーザを用いたときの干渉縞画像を Fig 2(a)と(b)に示し、それぞれのラインプロファイルをFig 2(c)と(d)に示す。レーザ光に比べ、干渉縞の鮮明度が 若干低くなるが、バラつきが大きく減り、高精度の位相 計測が可能となる。



Fig 2 Interference fringe pattern and its line profile formed using a SLD (a, c) and a He-Ne laser (b, d)

3.2 システム誤差の低減

次にシステム誤差を評価するため、試料がない状態 で、位相計測を行い、バックグランドノイズとして用いる。



Fig 3 Experimental results for evaluating the residual noise of phase measurements: (a) 3D plot, (b) line profile.

システムの高い再現性から、このバックグランドノイズ はほとんど変わらず、実際の計測結果から引き算するこ とで除去できる。このように得られたシステムの残差を Fig 3に示し、Fig 3(a) は3Dプロットで、(b)はラインプロフ ァイルである。システム誤差を除いた波面のrms値が 0.38nmと得られ、高精度の計測が可能であることが分 かった。

3.3 ITO薄膜の計測

低コヒーレンス光源を用いた位相シフト干渉顕微鏡の 有効性を示すため、対向ターゲット式スパッター法で作 成したITO薄膜の測定を行った。サンプルの顕微鏡写 真をFig 4(a)に示す。計測結果をFig 4(b)~(d)に示し、 (b)はπ/2ずつの位相シフトを与えた時の4つの干渉縞画 像の一つで、(c)は計測で得られた位相分布の3Dプロッ ト、(d)は中心部の膜厚のラインプロファイルである。計 測で得られた膜厚は約100nmで、膜作成時の目標膜厚 と一致し、また、触針式膜厚計Dektok3030による計測 値の97.4nmにも近い。



Fig 4 Experimental results for measuring the thickness of an ITO thin film: (a) micrograph of the sample, (b) interference fringe pattern, (c) 3D plot of the measured phase, (d) line profile.

5. おわりに

ウォラストンプリズムの横移動を用いた共通光路透過 型位相シフト干渉顕微鏡に発振波長の半値幅が5nmほ どある広帯域光源であるスーパールミネセントダイオー ドを光源として導入した。光源によるコヒーレントノイズを 大きく低減でき、実験で開発したシステムの有効性を確 かめた。さらに、照明光に自然放出光を用いているため、 高精度干渉計測と従来の肉眼による顕微観察の両立 が可能となり、フォトニクスやバイオニクスなどの広い分 野での応用が期待できる。

6 参考文献

- J. Chen, J. Endo, and H. Fujita, Proceeding of SPIE 4919, 364 (2002).
- [2] J. Endo, J. Chen, D. Kobayashi, Y. Wada, and H. Fujita, Appl. Opt. 41, 1308(2002).
- [3] 陳 軍, 東京工芸大学工学部紀要 Vol.43,No.1, PP.25-28(2020.6).
- 4) J. Schmit, and K. Creath, Appl. Opt. 34, 3610(1995).

偏光を考慮した鏡面反射のリアルタイムレイトレーシング

Real-time ray tracing of specular reflection with polarization

<u>今給黎 隆</u> Takashi Imagire

東京工芸大学、164-8678 東京都中野区本町2-9-5 2-9-5 Hon-cho, Nakano-Ku, Tokyo 164-8678, Japan

概要

ゲームグラフィックスの世界において、GPUの性能の 向上からリアルタイムレイトレーシングが注目を集めてい る。ゲームグラフィックスの世界では、レイトレーシングに おける光線の反射率に関して、Schlickによる近似を用 いたフレネルの式が用いられる場合が多い。しかしなが ら、レイトレーシングが得意な鏡面反射では偏光の効果 が生じやすく、Schlickによる近似との差がレンダリング 結果に表れやすいものと考えられる。今回は、偏光を考 慮したリアルタイムレンダリングの手法を定式化し、偏光 を考慮したレイトレーシングでの高速化手法を検証す る。

1. はじめに

Windows 10において、2018年のOctoberアップデート でDirectX Raytracingが導入され、デジタルゲームでの レイトレーシングが身近な存在となってきた。しかしなが ら、コンピュータグラフィックスの世界では、高速に計算 を行うための近似計算が随所に用いられている。頻繁 に用いられるものにフレネルの式に対するSchlickの近 似がある[1]。Schlickの近似は偏光していない光に対し ての近似式である。一方、光の反射には偏光が伴う。偏 光に伴う反射率の違いは、PLフィルターや偏光サング ラスを用いることで観察できることが知られているが、必 ずしもこれらの機器は必要ではない。p波の光は特定の 反射角度で反射率が0になるブリュースター角が存在す る。ブリュースター角で反射させた光を、そのp波の向き と反射後のs波を直交させ、ブリュースター角での反射 をさらに行えば、p波の光の反射率は0になるため、その 光は完全に吸収される。このように、偏光の効果はレン ダリングにおいて目で見える結果として観測されるはず であり、高次反射を考慮しつつも現状では十分にレイの 本数を増やすことができないリアルタイムレイトレーシン グの分野では、偏光による効果のレンダリング結果への 影響度の調査は重要なテーマとなる。本研究では、リア ルタイムレイトレーシングへの偏光の導入を定式化する と共に、レイ間で受け渡すデータを削減することによる 偏光処理の高速化を提案し、その効果を検証する。

2. 偏光を伴う反射

光の運動は電磁波としてMaxwell方程式によって記述される。真空中の光が屈折率nの物体の表面で反射される際は、反射後の電場の強度は、反射面に平行な成分(s波)と反射方向及びs波に垂直な成分(p波)に対して、フレネルの式として知られる振幅反射率r,srpの係数が乗算された値となる。

$$\begin{split} r_{s} &= \frac{\cos\theta - n\sqrt{1 - \frac{\sin^{2}\theta}{n^{2}}}}{\cos\theta + n\sqrt{1 - \frac{\sin^{2}\theta}{n^{2}}}} = \frac{\cos\theta - \sqrt{n^{2} - 1 + \cos^{2}\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^{2} - 1 + \cos^{2}\theta'}}\\ r_{p} &= \frac{n\cos\theta - \sqrt{1 - \frac{\sin^{2}\theta}{n^{2}}}}{n\cos\theta + \sqrt{1 - \frac{\sin^{2}\theta}{n^{2}}}} = \frac{\cos\theta - \frac{1}{n^{2}}\sqrt{n^{2} - 1 + \cos^{2}\theta}}{\cos\theta + \frac{1}{n^{2}}\sqrt{n^{2} - 1 + \cos^{2}\theta}}. \end{split}$$

ここで、θ は光の入射角及び反射角である。拡散反射 や鏡面反射光の相関は切りたい。そのため、電場では なく、電場の二乗であるエネルギー及び輝度に関して、 s波とp波の分解を行う。

$$\begin{split} \vec{l}_{s} &= (1 - r_{s}^{2}) \frac{\vec{l}^{D}}{2} + r_{s}^{2} \left(\frac{\vec{l}^{s}}{2} + \vec{l'}_{s} \right), \\ \vec{l}_{p} &= \left(1 - r_{p}^{2} \right) \frac{\vec{l}^{D}}{2} + r_{p}^{2} \left(\frac{\vec{l}^{s}}{2} + \vec{l'}_{p} \right), \\ \vec{l'}_{s} &= \left| \vec{e}_{s} \cdot \vec{e}_{s}^{in} \right| \vec{l}_{s}^{in} + \left| \vec{e}_{s} \cdot \vec{e}_{p}^{in} \right| \vec{l}_{p}^{in}, \\ l'_{p} &= \left| \vec{e}_{p} \cdot \vec{e}_{s}^{in} \right| \vec{l}_{s}^{in} + \left| \vec{e}_{p} \cdot \vec{e}_{p}^{in} \right| \vec{l}_{p}^{in}. \end{split}$$

I, *I*,はレイが交差した点でのレイの方向への放射輝度 であり、*P*, *P*,は反射方向から入射する輝度、*P*, *F*は レイの方向への拡散反射光及び鏡面反射光である。 その他の向きについては、*d*を入射方向、*r*を反射方 向として、Fig. 1の表記に従う。





Fig. 2. 提案法による結果。左からガラスの壁や金属の箱が置かれたシーン。コーネルボックス。オート バイのエンジン。

Fig.1本手法の反射における記号の可視化

3. 偏光反射におけるペイロードの削減

高次のレイを発生させた際にレイ間で受け渡す 情報がペイロードである。今研究では、高速化のた めにペイロードのデータを削減する提案を行う。

3.1 s波の余弦の保持

ペイロードには、s波の振動する向きが必要である。 この向きは3次元ベクトルであるが自由度を減らす ことができる。振動の向きが進行方向に直交するこ とから、自由度は進行方向周りの1次元の角度とな る。また、角度に関して360度ではなく、180度の自 由度を扱うことができれば良いので、入射角の余弦 を保持することで、s波の振動の向きを復元できるよ うにする。

3.2 s波の係数としてのp波の保持

ペイロードのデータ数を増やしている要因の一つは、s波とp波の2つの色ベクトルを伝搬することにある。p波の大きさをs波のスカラー倍として持つことで、ペイロードの容量を8バイト削減する。

4. 実験

手法の実装と評価を行った。実験に用いたPCは CPUにCore i7-13900KF、メインメモリ32GB、ビデオ カードは24GBのメモリを搭載したGeForce RTX 4090を 用いた。Fig. 2 において、ガラスの壁や金属の箱が置か れたシーンは36頂点28ポリゴン、コーネルボックスが74 頂点38ポリゴン、オートバイのエンジンは10448頂点、 12510ポリゴンである。解像度は、壁や箱のあるシーン が、1920×1080、コーネルボックスとエンジンのシーンは、 2048×2048である。表1がペイロードの削減手法の違い による実行速度の変化である。Schlick近似が最も高速 にしても、その後は右肩上がりに実行速度が向上するこ とが期待されたが、今回の提案の高速化手法では、残 念ながら、大きな高速化を果たすことはできなかった。 むしろ各グラフの一番右の無偏光の正確なフレネルの 式の方が、Schlickによる近似手法よりも高速に計算す ることができた。

5. まとめと課題

レイトレーシングにおける偏光の効果の検証と、偏光 を考慮したリアルタイムレイトレーシングにおけるペイロ ードの削減をする手法を提案した。ペイロードを削減し た際の実行速度の向上は今回の実験では見られなか った。特にp波をs波のスカラー倍とするペイロードの削 減方法の提案では、状況によってはレンダリングされる 色に大きな誤りが出ることが判明した。しかしながら、よ く使われているSchlickの近似法は、現代的なリアルタイ ムレイトレーシングの環境では必ずしも高速ではなく、s 波とp波の平均の反射率を用いるのが、導入が容易で レンダリング品質を向上させる実用的な手法であること が判明した。今回の結果は、GPUの種類や描画するシ ーンによって結果が変わる可能性があるため、今後は、 より詳細にボトルネックを調査し、効果的な改善手法を 提案したい。

6. 参考文献

 Schlick, C. "An inexpensive BRDF model for physically based rendering." In Computer graphics forum, Vol. 13, No. 3, pp. 233-246 (1994).



表1. 各シーン及び手法における実行速度

二つの有機色素を用いた金属様光沢の混色

Mixing Metallic Luster with Two Organic Dyes

<u>山田勝実</u>、矢島 仁 Katsumi Yamada, Hitoshi Yajima

東京工芸大学、243-0297 神奈川県厚木市飯山南5-45-1 5-45-1 liyama-minami, Atsugi, Kanagawa 243-0297, Japan

概要

二つの色素を透明支持体の中に静電吸着により共存させ、それぞれの色素の光吸収による反射光が混ざり合いどのような金属様光沢の色調になるのかを検討した。検討の結果、単純に二つの色素の反射光が混色された金属様光沢にはならなかった。色素共存下の反射光には、それぞれの単独時の反射光にはない新たな波長の反射光が認められた。今後、任意色の金属様光沢を得るためには、支持体に共存させる色素の量的な関係や凝集状態を制御する必要がある。

1. はじめに

様々な物質には結合電子が存在し、それらの振 動と入射光(電磁波)が共鳴して光吸収が起こる。 光吸収の後には受け入れたエネルギーを二次光 として放射する場合がある。一例としての反射光 では、取り入れた光と放出する光が同じ波長(色) となる。本物の金属の反射(金属光沢)もこれと 同様となる。例えば、鏡で自分を見たとき、実際 の顔色と反射色が違っていたら大変なことにな る。そういった意味では、私たちは物質に吸収さ れた光と出てくる光が同じ波長になる現象を毎 日見ている。

私たちが近年はじめた金属元素を用いない物 質からの金属様光沢の研究も同じような現象に 基づくものと言える。[1]一般的な塗料や繊維に染 められている色素は、色素分子の間隔が空いてい る状態が多く、透過色(白色光から色素が吸収し た光が取り除かれたもの)が利用されている。一 方、私たちが行っている研究では、色素分子の間 隔が全くないかかなり小さい状態でのみ、金属様 光沢(反射色:色素が吸収した光がそのまま返っ てくる)が観察されることが明らかとなっている。 これらの研究では色素を静電的に固定できる透 明高分子シートを用いていたが、色素の間隔や色 素の配向状態を変えられることが特徴である。[2] これまでに、色素が1種類でも、色素の固定条件 を変えることで異なる色調の金属様光沢を得る ことに成功した。ここでは、二種類の色素を共存 させた状態で、それぞれの色素の反射光が観察で きるか、また二つの色素の反射光は単純に加算さ れたものになるかどうかについて検討した。

2. 色素を共存させたNafionシートの作製

クロロホルムにクリスタルバイオレット(CV)を 溶解させて0.5 mol/LのCV溶液、エタノールにシア ニン色素(CY)を溶解させて0.1 mol/LのCY溶液を それぞれ調製して、これらを混合した。この混合色 素溶液にNafion117シートを浸して、色素を静電的 に固定化した。二種類の色素を導入したNafionシー ト(Nafion+CV+CY)を拡散透過・反射測定システム OP-TR/RF-GONIO-MNを用いて光源と検出の角度 を30°で試料に白色光を照射し、正反射スペクトル を測定した。

3. 結果および考察

それぞれの色素を導入した Nafion シート (Nafion+CV,Nafion+CY)および条件を変えてCVとCY を共存させたNafionシート(Nafion+CV+CY)の色調を



Fig.1. 各試料の色調

図1に示した。色素を共存させた試料から金属様光沢 が得られたこと、単独時と混合時で色調が異なること、 色素の混合条件によって色調が異なることが明らかとな った。図2に、それぞれの試料の反射スペクトルを示し た。全てのNafion+CV+CYでは、Nafion+CYで認めら れた波長640 nmの反射極大が認められず、どちらの単 独試料にも認められなかった波長700 nm付近の反射 極大が認められた。Nafion+CV+CYでは混合溶液内の CVに対するCYの割合が多くなるに従い、Nafion+CV で認められた波長620 nmの反射極大は小さくなり、長 波長側にシフトすることが明らかとなった。色素を共存さ せた試料で新たに観察された反射極大は、CYの凝集 体の吸収に基づくものである。これらのことから、Nafion シート内部にCVが存在することで、単量体状態のCYは 取り込まれにくいこと、それでもNafionシートに進入した CYは凝集体として残留していることが考えられる(図3)。 [3]



Fig.2. 色素の仕込み比率と得られた試料の反射スペクトル



Fig.3. Nafionシートに取り込まれた各色素の 状態を示した模式図

4. まとめと課題

図4にそれぞれの色素が単独で存在する試料および 色素が共存した状態での試料の反射の様子を模式化 したものを示した。Nafion+CVでは、白色光のうち緑と オレンジ色の光が反射し、残りは屈折(シートに進入)し た。Nafion+CYでは、白色光のうち赤みのオレンジ色の 光が反射し、残りが屈折した。一方、Nafion+CV+CYで は、白色光のうち緑、オレンジ、赤みのオレンジ色の反 射光に赤色の反射光が加わり、残りが屈折した。

このように色素共存下でもそれぞれの色素の金属様 光沢が現れた。しかしながら、単独時には認められなか った凝集体の反射光が現れ、単純な反射光の混色に はならなかった。また、一方の色素の導入量を増やすこ とができず、混合溶液の仕込み比率を反射光の混色に うまく反映できなかったようである。今後は、色素分子の 電荷密度のような静電的な観点から色素の選択を行い、 導入量の制御を試みることでより精密な検討が行えるよ うになるものと考えられる。

5. 参考文献

- H. Yajima, et.al., "Influence of Photo-illumination on Greenish Metallic Luster of Safflower Red Pigment Film" Bull. Soc. Photogr. Imag. Japan., Vol. 28, No. 2, 18-22 (2018).
- [2] T. Kaki, K. Yamada, "Metallic Luster from Two Organic Pigments without Metallic Elements -Relationship between Molecular Orientation by Stretching and Polarization Reflection -" Bull. Soc. Photogr. Imag. Japan., Vol. 31, No. 2, 5-8 (2021).
- [3] K. Yamada, T. Oda , "Mixing Metallic Luster with Organic Dyes" Bull. Soc. Photogr. Imag. Japan., Vol. 32, No. 2, 21-23 (2022).



Fig.4. 各単独色素試料と共存試料の反射の模式図

黒鉛層間化合物の色標本の作製 Preparation of Color Samples of Graphite Intercalation Compounds

<u>松本里香</u>, 大嶋正人, 山田勝実, 行谷時男, 實方真臣 <u>Rika Matsumoto</u>, Masato Oshima, Katsumi Yamada, Tokio Yukiya, and Masaomi Sanekata

東京工芸大学、243-0297 神奈川県厚木市飯山南5-45-1 Tokyo Polytechnic Univ., 5-45-1 liyama-Minami, Atsugi-shi, Kanagawa 243-0297, Japan

概要

黒鉛層間化合物(Graphite Intercalation compound; GIC)の中には、ホストの黒鉛とは異なり、金色や青色、 緑色などの色を呈するものが多い。GICの色はGIC研究 にとって重要な情報であるが、論文や教科書にGICの 写真が掲載されることは少ない。よって、我々は、さまざ まな有色のGICを合成し、合成方法、構造、特性等のデ ータをまとめた色標本を兼ねたデータベースの構築を 始めた。また、GICの多くは大気下で不安定である。よ って、より正確な情報を記録するために、大気非暴露環 境における写真撮影、構造・物性評価を試みている。

1. はじめに

黒鉛(Graphite)は黒色の層状物質である。黒鉛の層 間の相互作用は弱いため、その層間にカリウム(K)やカ ルシウム(Ca)などの金属原子や塩化鉄(FeCl₃)や硫酸 (H₂SO₄)などの分子等が挿入し、黒鉛層間化合物(GIC) を形成する(Fig. 1)。GICの中には金色や青色等の有 色のものも多い。この色変化は挿入物質(インターカレ ート)と隣接する黒鉛層(グラフェン面)との間の電子移 動の結果であるため、GICの色の観察はGICの特性を 議論する際にも重要となる。しかし、GICの色に関する 情報は乏しく、カラー写真で色を示した例が少ない。 GICはグラフェンやポストリチウムイオン電池などの先端 研究に深く関係するため、現在、GIC研究は注目を集 め、新しくGIC研究を始める研究者も増えている。よって、 GICの色標本を作製し、情報を提供することは重要であ ると考えている。



本研究は、2019年度に始まり、さまざまなGICを合成 し、カラー写真を撮影し、合成方法、構造、特性等と共 に整理しようとしている。しかし、GICの多くは大気下で 不安定であるため、大気下での実験では正確な構造解 析や物性測定が難しかった[1,2]。よって、最近2年間は 「有色黒鉛層間化合物の大気非暴露環境における構 造・物性評価」と題し、大気非暴露環境における測定を 行い、GIC本来の構造や特性を評価することを目指して きた[3, 4]。本発表では、大気非暴露測定の検討を中心 に、この4年間の主な成果を報告する。

2. 実験

2.1 合成

合成した主なGICをTable 1にまとめた。H₂SO₄-GICは 液相法で合成したが、それ以外のGICはすべて気相法 を用いた。気相法は黒鉛と反応物質をガラス反応管に 真空下で封じ、加熱する。ホスト黒鉛にはポリイミド由来 のシート状黒鉛であるPGS (Panasonic)を標準とし、その 他、高配向性熱分解黒鉛 (HOPG) や天然粉末黒鉛を 用いた。

Fable 1 GIC samples	and t	their	reaction	conditions.
---------------------	-------	-------	----------	-------------

Туре	Reagents	Heating	
AM-GIC	AM = K, Rb, Cs	200 °C, 1-3 d	
Ca-GIC	Ca	500 °C, 3 d	
K-Hg-GIC	K, Hg	210 °C, 7 d	
FeCl ₃ -GIC	FeCl₃	300 °C, 3 d	
MoCl ₅ -GIC	$MoCl_5$ (, MoO_3)	300 °C, 3 d	
CuCl ₂ -GIC	CuCl ₂	500 °C, > 14 d	
CuCl ₂ -AlCl ₃ -GIC	CuCl ₂ , AICl ₃	150 °C, > 6 h	
AICI ₃ -GIC	AICI ₃ , C ₄ H ₄ CINO ₂	115 °C, 24 h	
H ₂ SO ₄ -GIC*	H ₂ SO ₄ , HNO ₃	r.t., >3d	

2.2 色の記録

GICの色の記録は写真と反射スペクトルを用いる。写 真はすべてのGICサンプルを同一環境・同一条件にお いて撮影した。反射スペクトル測定には膜厚測定システ ム(F20, FLIMMETRICS)を用いた。

2.3 構造解析

X線回折およびラマンスペクトル測定を行った。 X線回折は大気下、または気密ホルダーを用いてAr 雰囲気下で測定した。ラマンスペクトルは密封セル を用いて大気非暴露で測定した。

2.4 物性測定

大気下またはAr雰囲気下で電気伝導率を四端子法 で測定した。

3. 結果と考察

3.1 重アルカリ金属GIC

K-、Rb-、Cs-GICsに関して、それぞれステージ1およ びステージ2構造(Fig. 2)のサンプルを合成した。



アルカリ金属GICは大気下で極めて不安定であり、特 にステージ1構造は大気下では正確な構造を測定でき なかった[4]. Fig. 3は、PGSをホストとしたステージ1構造 のK-GICの大気非暴露では金色をしているが、大気曝露 と同時に速やかにステージ2構造の青色へ、さらに黒鉛 の黒色へと変化した。Fig. 4はK-GICを大気下、Ar下 (露点-50℃)、純Ar下(露点-65℃;酸素濃度 0.15 ppm) に取り出して3分後に測定したXRD図である。大気下や Ar下ではステージ2や3構造が現れている。これは層間 からKが脱離、つまりGICの分解が生じたことを表してい る。一方、純Ar下では分解は生じず、ステージ1構造を4 時間経過後も維持していた。



Fig. 3 Photo of stage 1 K-GIC prepared from PGS.



Fig. 4 XRD patterns of stage 1 K-GICs prepared from PGS after 3 min. exposure to atmospheres; 1~3 : stage numbers, * :holder.

各GICのステージ1と2構造のGICのラマンスペクトル と反射スペクトルを大気非暴露で測定した [1,2].

PGSをホストとしたステージ1構造のK-GICの電気伝 導率を大気下と純Ar下で測定した。ホストであるPGSの 電気伝導率が4.8×10³ Scm⁻¹ であるのに対し、大気接 触30分以内の測定で3.7-5.4×10⁴ Scm⁻¹(平均4.3×10⁴ Scm⁻¹)、純Ar下では3.2×10⁴ Scm⁻¹であり、純Ar下での 値は大気下よりも低かった。ただし、測定数が少ないの で、今後再現性を確認する必要がある。また、大気下測 定とは異なり、純Ar下では4時間経過後も電気伝導率 は変化しなかった。

3.2 金属塩化物GIC

金属塩化物GICはアルカリ金属GICに比べて安定性 が高く、大気下での構造および物性測定が可能である。 一方、色は深青色~深緑色と暗く(Fig. 5 左)、さらに、 合成中に発生する塩素ガスによりサンプル表面に膨ら みが生じることが多く、反射スペクトル測定が難しい。ま た、CuCl₂-GICはPGSをホストに用いた場合、反応が極 めて遅かった。また、GIC形成も表面のみに限定され、 明瞭な色変化も観察されなかった(Fig. 5 右)。



Fig. 5 Photos of FeCl₃- and CuCl₂-GICs from PGS.

3.3 アルカリ土類GIC

Ca-GICやSr-GICは気相法ではPGS表面近傍にしか 形成しなかった。色変化は鮮明であり、ステージ1構 造はアルカリ金属GICよりも赤色味の少ない金色で あった [4]。ただし、ステージ1以外の構造は合成で きない。

4. まとめ

代表的な有色GICを合成し、その色を正しく記録する ために写真撮影および反射スペクトル測定を行った。さ らに、構造解析や物性測定を行い、色を軸としたGICの データベースの構築を進めている。大気下でのGICの 分解を防ぐための大気非暴露環境での測定方法も構 築した。今後は、Li-GIC等の未着手のGICの合成・測 定を行い、発表する予定である。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費JP 21H05234の助成を受けた ものです。また、実験にご協力頂いた阿久沢昇 東京高専名 誉教授に感謝します。

参考文献

- [1] 松本里香, 大嶋正人, 山田勝実, 行谷時男, 實方真臣, 第 46回炭素材料学会年会 (オンライン, 2020.12).
- [2] R.Matsumoto, M. Oshima, K. Yamada, T. Yukiya, M. Sanekata, 3rd International Symposium for Color Science and Art 2020-2021(Online, 2021.03).
- [3] 松本里香, 大嶋正人, 山田勝実, 行谷時男, 實方真臣, 第 47回炭素材料学会年会 (オンライン, 2021.12).
- [4] R.Matsumoto, M. Oshima, K. Yamada, T. Yukiya, M. Sanekata, 3rd International Symposium for Color Science and Art 2022(Online, 2022.03).



[Date] 2023.3.4 Sat. 10:00-18:20 [Organizer] The International Research Center for Color Science and Art, Tokyo Polytechnic University (TPU) [Venue] Nakano Campus of Tokyo Polytechnic University



