

2022 年度 修士学位請求論文

色覚特性を考慮した色変換による
ゲームの有利不利制御手法

明治大学大学院先端数理科学研究科

先端メディアサイエンス専攻

藤原 優花

Master's Thesis

A method of controlling online game
advantage/disadvantage by color transformation
considering color vision characteristics

Frontier Media Science Program,

Graduate School of Advanced Mathematical Sciences,

Meiji University

Yuka Fujiwara

概要

インターネットの普及や COVID-19 の影響により、オンラインゲームの人気が高まっている。オンラインゲームの魅力の一つとして、世界中の多くのプレイヤーと遊べる事が挙げられる。しかし、プレイヤーの中にはハンディキャップを抱えている人がいる。例えばプロとアマチュア、大人と子供などや視力や聴力が弱い人など様々なハンディキャップが挙げられる。特に身体的なハンディキャップを抱えているプレイヤーは、純粋な練習量や技量では補うことが困難であり、システムを通して支援を行う必要がある。ハンディキャップには様々な種類が存在するが、本稿では色覚多様性者に着目する。

色覚多様性者は一般色覚者が見える色とは異なる見え方をしており、色の鮮やかさに欠ける。日本では男性の 20 人に 1 人、女性の 500 人に 1 人が色覚多様性者だと言われており、その数は少なくない。色覚多様性者は色から得られる情報が少なく、一般色覚者と比べて反応速度が遅くなる。特にオンラインゲームにおける反応速度の違いは勝敗に直結するため、色覚多様性者と一般色覚者間で不平等な状況が生じてしまう。そのため、ゲーム制作側は色覚サポートを実装し、フェアな状況に近づけるように対策を行っている。しかし、色覚多様性にも複数のタイプが存在しており、色覚サポートだけでは必ずしもフェアな状況をつくりだしていないのが現状である。そこで本研究では、「様々な特性がある色覚多様性者がゲームをプレイする際の色によるハンディキャップをなくす」ことを目的とする。

まず、色覚多様性者と一般色覚者にとって識別しやすい色やその指標の調査を行った。具体的には、選択肢の中で異なる 1 色を正確に素早く選択してもらう実験を行い、正答率や選択時間を分析した。しかし、色覚タイプは複数あり、また分析が行えるほど色覚多様性者を集めることが困難である。そこで、一般色覚者が見ている色を色覚多様性者が見ていると思われる色に変換し、一般色覚者を対象に実験を行った。色の選定においては、色覚多様性者は明度の差が大きい色が識別しやすいという先行研究の結果をもとに行った。結果として、彩度と明度の値に差があることや、注目したい色の明度が周りの色の明度と比べて高い場合は両者にとって識別しやすい要因であることが明らかになった。

次に、実験結果で得られた識別しやすい指標をもとに仮説を立て、実際のゲームで有利不利の制御が可能か検証した。具体的にはリアルタイムで色覚多様性者が見ていると思われる色に変換するシステムを用いて、色覚多様性者と一般色覚者を混ぜた環境でゲームを行った。結果として、配色次第で状況を有利にも不利にもすることが可能であることがわかった。また実験協力者が一般色覚者だったため、普段見ることのない色の世界を利用した新たな戦術を試しているポジティブな場面も見られた。

最後に、現状のメジャーな esports ゲームにおいて色の識別困難性がゲームプレイに及ぼす問題について調査を行った。具体的にはリアルタイムで色覚多様性者が見ていると思われる色に変換するシステムを用いて、esports のジャンルであるパズルゲームの「ぷよぷよ」

と FPS ゲームの「VALORANT」における色覚サポートの問題を調査した。結果として、T型色覚者は色のハンディキャップがあまりないこと、現状の色覚サポートではフェアな状況をつくり出せていないことがわかった。

本研究では、リアルタイムで色覚多様性者が見ていると思われる色に変換するシステムを提案した。今後は他のゲームジャンルにおける色覚サポートの問題の調査を行い、抽象的なゲームデザインに対して明確化したガイドラインの作成を目指す。また、本システムがより身近に使えるように、PCのスペックに依存しないシステムの開発や本システムを通じて色覚多様性者に関する啓蒙を目指す。

Abstract

Online games are becoming increasingly popular due to the widespread use of the Internet and the influence of COVID-19. One of the attractions of online games is that they can be played by many players worldwide. However, some players are disabled. For example, professionals and amateurs, adults and children, people with poor eyesight, people with poor hearing, and so on. In particular, players with physical handicaps are difficult to compensate for with pure practice and skill and must be addressed through the system. While there are a variety of handicaps, this paper focuses on color vision diversity.

Color vision diversity sees colors differently from normal color vision, which is not as vivid. In Japan, color vision diversity is considered one out of every 20 males and one out of every 500 females. Color vision diversity has less information from colors, and their reaction time is slower than that of normal color vision. Differences in reaction time in online games directly affect the game's outcome, resulting in an unequal situation between color vision diversity and normal color vision. Therefore, game creators are implementing color vision support to make the situation fairer. However, there are several types of color vision diversity, and more than color vision support is needed to create a reasonable condition. Therefore, the objective of this study is to "eliminate the handicap caused by color when people with various characteristics with color vision diversity play games."

First, we surveyed colors and their indices that are easy to discriminate for color vision diversity and normal color vision. Specifically, we conducted an experiment in which participants were asked to select a different color from a set of alternatives correctly and quickly and analyzed the correct response rate and selection time. However, there are several types of color vision, and it is difficult to collect enough color vision diversity subjects to conduct the analysis. Therefore, we showed an experiment limited to normal color vision by converting the colors seen by normal color vision into the colors that color vision diversity is likely to see. The color selection was based on the results of a previous study, which showed that color with a significant difference in lightness was easier to discriminate for color vision diversity. As a result, it was found that the difference between the values of saturation and hue, and the fact that the joy of the color of interest is greater than that of the surrounding colors, make it easier for both groups to discriminate colors.

Next, we developed a hypothesis based on the discriminability indices obtained from the experimental results and verified whether it could control advantages and disadvantages in an actual game. Specifically, a game was played in an environment with a mixture of color vision diversity and normal color vision using a system that converts colors in real time to those that color vision diversity is likely to see. As a result, it was found that it was possible to make the situation either favorable or unfavorable depending on the color scheme. Since the participants were normal color vision, there

were some festive scenes in which they tried new tactics using the color world that they do not usually see.

Finally, we investigated the problem of color discrimination difficulty in gameplay in current major esports games. Specifically, we investigated the issue of color vision support in the esports genres of the puzzle game "Puyo Puyo" and the FPS game "VALORANT" by using a system that converts colors to those that colorblind people would see in real-time. As a result, we found that T-type color vision users have a little color handicap and that the current color vision support does not create a fair situation.

In this study, we proposed a system that converts colors in real time to those that colorblind people would see. In the future, we will investigate color vision support issues in other game genres and aim to create clarified guidelines for abstract game design. We also aim to develop a system that does not depend on PC specifications and to educate people about color vision diversity through this system so that this system can be used more efficiently.

目次

第1章	はじめに.....	1
1.1.	ゲームにおけるハンディキャップ.....	1
1.2.	色覚多様性者とオンラインゲーム.....	1
1.3.	ゲーム内の色覚サポート.....	3
1.4.	本研究の目的.....	5
1.5.	本稿の構成.....	6
第2章	関連研究.....	7
2.1.	色覚に関する研究.....	7
2.1.1.	色覚多様性に関する研究.....	7
2.1.2.	色覚シミュレーションに関する研究.....	7
2.1.3.	色覚多様性者の支援に関する研究.....	8
2.2.	ゲームデザインに関する研究.....	9
第3章	色覚間でのハンディキャップ制御を可能とする組み合わせ色判定手法.....	10
3.1.	手法の概要.....	10
3.2.	様々な色の表現法.....	10
3.2.1.	RGB.....	10
3.2.2.	CIEXYZ.....	11
3.2.3.	LMS.....	11
3.3.	色覚模擬フィルタ再現のための計算方法.....	11
第4章	両者間の2色における識別しやすい色の調査.....	16
4.1.	プレ実験.....	16
4.1.1.	実験概要.....	16
4.1.2.	プレ実験の結果・考察.....	18
4.2.	本実験.....	18
4.2.1.	実験概要.....	18
4.2.2.	本実験の結果.....	20
4.2.3.	考察.....	20
4.2.4.	2色間における識別容易色の調査のまとめ.....	23
第5章	背景色を考慮した両者間の2色における識別しやすい色の調査.....	24
5.1.	実験.....	24
5.1.1.	実験概要.....	24
5.1.2.	実験結果.....	26

5.2.	考察.....	28
5.3.	背景色を考慮した両者間の2色における識別しやすい色の調査のまとめ.....	30
第6章	リアルタイム色変換システム.....	31
第7章	Among Usを用いた有利不利制御の検証.....	33
7.1.	実験.....	33
7.1.1.	実験概要.....	33
7.1.2.	Among Us.....	33
7.1.3.	実験の仮説と色の選定.....	35
7.1.4.	実験手順.....	37
7.2.	実験結果.....	38
7.3.	考察.....	39
7.4.	Among Usを用いた有利不利制御の検証実験のまとめ.....	42
第8章	現状の色覚サポートが抱える問題の調査.....	44
8.1.	実験.....	44
8.1.1.	実験概要.....	44
8.2.	パズルゲームにおける現状の色覚サポートの問題の調査.....	44
8.2.1.	ぷよぷよ.....	44
8.2.2.	実験手順.....	45
8.2.3.	実験結果.....	46
8.2.4.	考察.....	47
8.3.	FPSゲームにおける現状の色覚サポートの問題の調査.....	48
8.3.1.	VALORANT.....	48
8.3.2.	実験手順.....	49
8.3.3.	実験結果.....	50
8.3.4.	考察.....	51
8.4.	現状の色覚サポートが抱える問題の調査のまとめ.....	53
第9章	総合考察と今後の展望.....	54
第10章	おわりに.....	55

第1章 はじめに

1.1. ゲームにおけるハンディキャップ

コンピュータ上での対戦型オンラインゲーム[1]の人気の高まり， esports[2]と呼ばれるスポーツの一種として認識されるようになった。オンラインゲームとは，多くのプレイヤーが同時にプレイするネットワーク型のゲームを指す[3]。オンラインゲームの魅力は，インターネットを通じて同じゲームの世界を共有できること，ゲームを介して人とコミュニケーションがとれることなどが挙げられ，多くの人に楽しまれているコンテンツである。加えて，新型コロナウイルス（COVID-19）の影響により外出自粛要請が出され，多くの人が家で過ごす時間が増えたことから，オンラインゲームの需要はさらに高まっている[4]。

このようなオンラインゲームのプレイヤーは多種多様であり，中にはハンディキャップを持つ人たちもいる。このハンディキャップとは，弱者から見た強者との差を指す言葉である。大人と子供や，プロとアマチュアなどの知識や技量の差だけでなく，聴力や視力が弱い人も他のプレイヤーと対戦するゲームや記録を競うゲームなどにおいて，不利になってしまう場合がある。例として，音が聞こえづらいために敵の位置を把握することが困難になることや，視力が弱いために敵味方の判断に時間がかかってしまうといったことが挙げられる。ゲームの公平性の問題において，技量による部分は練習により改善することが可能であるが，身体にまつわる部分については独力での改善が難しいため，システムの支援により公平性を保つことが望ましい。その中でも本稿では，一般色覚者と比べて色の見え方が異なる色覚多様性者のゲームにおけるハンディキャップに注目する。色覚多様性者に着目した理由として，色以外の要素から状況を把握しなければいけないためフェアではないこと，また筆者自身も色覚多様性者の一人であることが挙げられる。

1.2. 色覚多様性者とオンラインゲーム

色覚多様性者は，赤や緑などの特定の色が一般色覚者と比べて異なった見え方をすることを目指す[5]。一般色覚者とD型（Deuteranope）色覚者の見えている色の例を図1に示す[6]。この場合，D型色覚者は電源ONとOFFを色により区別できないが，電源を操作して照明がついたかを目視して判断ができる。また，Post[7]は障害物のない荒野に暮らす民族が色覚多様性者の場合，生活するのに不利であるが生きることができると言及している。このように色覚多様性者は，日常生活において信号の色の識別や駅のホームの案内など，色による情報收拾で苦労することが多いが，日常生活において支障をきたすほどの不便を感じずに過ごしている人が多い。

次に一般色覚者と色覚多様性者の見えているぶよぶよ[8]のゲーム画面の例を図2に示す。ゲームをプレイする場面において，敵味方の判断やスキルの効果など，できるだけ早く判

断しなければならず、色も情報を取得する要因の一つになる。しかし、色覚多様性者にとって色から情報を得ることは容易でない。その結果、一般色覚者と色覚多様性者の間でパフォーマンスに差が生まれてしまい、ゲームの勝敗に影響を及ぼしてしまうことは珍しくない。



図1 一般色覚者（左）とD型色覚者（右）が見ている照明の電源例



図2 一般色覚者と色覚多様性者の見え方と男性におけるそれぞれの割合

©2018 SEGA ぷよぷよ

1.3. ゲーム内の色覚サポート

こうした色のハンディキャップを埋めるために色覚サポートを実装しているゲームが増えてきている。

例えば、3分間でどちらのチームがより多くのインクを塗れるか競う陣地取りゲームなどがプレイできる Splatoon3[9]では、敵・味方のインクを色で区別している（図3）。この敵・味方の色の識別性をあげるため、オンラインバトルで使用する色を黄色と青色に固定する機能を提供している。これにより、色覚多様性が見えにくい色の組み合わせに当たることなくゲームをプレイすることが可能である。しかし色覚タイプは複数存在するため、上記の例であげた色覚サポートだけでは、全ての色覚多様性者に対するサポートができていない。また、色覚サポートで使用されている色の組み合わせ自体が、色覚多様性者にとって識別容易性が低いことも多いという問題がある。

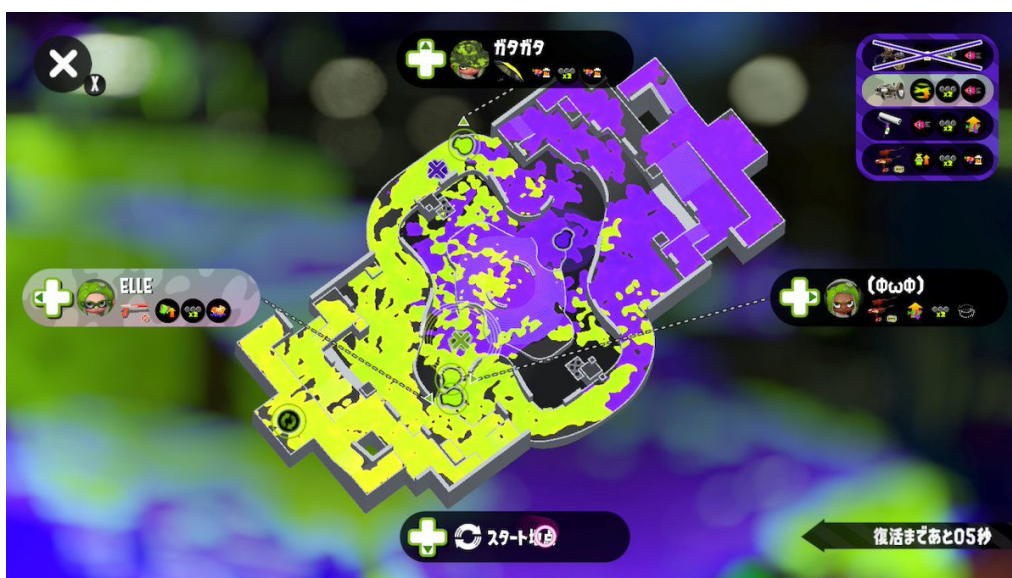


図3 Splatoon3の色覚サポートの例©2022 Nintendo Splatoon3

また、相手の本拠地を先に壊したチームが勝利するゲームである League of Legends[10]では、対戦相手の体力バーや対戦中のスキルの効果を識別しやすくするために、赤色や緑色などを黄色や青色などへ変更することや、ゲーム画面の明度やコントラストの微調整を行うことができる（図4・図5）。League of Legendsでは様々なキャラクターの見た目が隔週で追加されるが、購入してプレイすることで初めて視認性を確かめることができる。そのため、視認性が良いかわからずに購入しなければならないというデメリットがある。



図4 League of Legends の色覚設定の画面 ©2022 Riot Games League of Legends



図5 通常モード（上）と色覚特性モード（下）の画面
©2022 Riot Games League of Legends

さらに、鬼1人とその鬼から逃げて脱出する生存者4人の鬼ごっこゲームである *Dead by Daylight*[11]では、2021年3月に色覚サポートが実装された。しかし実装するにあたりゲーム制作側はゲーム内の視認性の問題について、原因はプレイヤー側であると発言し、炎上した。このように、色覚多様性の理解やゲームにおける色の重要性が広まっていないことがわかる。

このように、ゲームの種類によってサポート方法は異なるが、色のハンディキャップを持っている人にもゲームを楽しんでもらうような配慮が行われているケースもある。しかし、色覚多様性は欠損している錐体細胞によって色覚タイプが異なるため、上記の例であげた色覚サポートだけでは、全ての色覚多様性者に対するサポートができていない。また、色の識別が可能であっても、一般色覚者と比較すると識別容易性が低いことも多く、反応速度が遅くなるといった問題[12]や、ゲーム制作側の理解が不十分という問題[13]があり、筆者はこの問題に着目した。

1.4. 本研究の目的

本研究では、オンラインゲームにおいて一般色覚者と色覚多様性者間にある色のハンディキャップをなくすことを目的とする。具体的には、一般色覚者と色覚多様性者との間で色の識別にまつわる有利不利の制御の可能性について模索する。また、こうした色の識別にまつわる有利不利を制御可能なゲームを製作し、製作したゲームを通して一般色覚者に対して色覚多様性者に関する啓蒙を目指す。さらに、他のゲームにおいて色のハンディキャップを制御する場合に、手軽に利用可能な仕組みの実現を目指す。

本研究ではまず、色覚多様性者が識別しやすい色、一般色覚者が識別しにくい色などの軸や指標を実験によって明らかにする。色覚多様性者は複数のタイプがあり、各色覚タイプによって識別しやすい色が異なる[14]ため、オンラインで対戦するプレイヤーが、「一般色覚者と色覚多様性者」や「色覚多様性者と色覚多様性者」といった様々な組み合わせになった場合、それぞれが識別しやすい色は異なる。そのため、色覚多様性のタイプに合わせて様々な色の組み合わせについて調べる必要がある。しかし、一度の実験で全ての色覚タイプに合わせた検証を行うことができない。そこで本研究では、色覚多様性者の中でも比較的割合が多いD型(Deuteranope)色覚に焦点を当てて、よりゲーム環境に近づけた実験により、軸や指標を明らかにする。さらに、実験で得られた軸や指標をもとに実際のオンラインゲームを用いて有利不利を制御することが可能かどうか検証を行い、実際のゲーム環境下とこれまでの実験で得られた軸や指標の差分などについて考察を行う。具体的にはリアルタイムでゲーム画面の色を変換し、色覚多様性者と一般色覚者間でどのように有利不利が生じるのかなどを検証する。

1.5. 本稿の構成

本稿では、まず1章で色覚多様性者がオンラインゲームをプレイする際に生じる色のハンディキャップに関する問題の提起を行い、色覚サポートの現状とその限界について述べた。2章では本研究の関連研究について述べる。3章では、一般色覚者を対象に色覚多様性者が識別しやすい色や識別しにくい色の調査を行うための提案システムについて述べる。4章では、3章で述べた提案システムを用いて色覚多様性者や一般色覚者にとって識別しやすい色を調査するための実験を行い、その結果と考察について述べる。5章では、4章で行った実験に背景色を追加し、色覚多様性者や一般色覚者にとって識別しやすい色を調査するための実験を行い、その結果と考察について述べる。6章では、3章で述べた提案システムをリアルタイムで行うための改良について述べる。7章では4、5章で得られた知見をもとに、6章で述べたリアルタイム色変換システムを用いて実際のゲームにおける有利不利制御の検証を行い、その結果と考察について述べる。8章では、色覚サポートの現状とその問題点を調査するため、esportsのジャンルごとに分けた考察について述べる。9章では、本研究の総合的な考察と今後の展望について述べ、最後に10章で本論文をまとめる。

第2章 関連研究

2.1. 色覚に関する研究

2.1.1. 色覚多様性に関する研究

色覚多様性の症状は 1798 年に Dalton の報告[15]で初めて明らかになった。日本においては男性の場合は 20 人に 1 人、女性の場合は 500 人に 1 人が色覚多様性者であるといわれている[16]。さらに、男性の割合の中で、P 型(Protanope)色覚者は約 1.5%、D 型 (Deuteranope) 色覚者は約 3.5%、T 型(Tritanope)色覚者は約 0.001%といわれている[14]。Hilbert[17]は「色覚を持つことは物の色を見る能力があり、色覚多様性者はその能力が欠けている」と表現している。

色覚多様性が起こるメカニズムには、人間の眼球にある特定の範囲の波長の光に対する感光性を持つ LMS の 3 種類の錐体細胞が大きく関与している[18]。一般色覚者は 3 つの錐体細胞が正常に存在しているのに対して、色覚多様性者はこの 3 種類の錐体細胞のうち、どれかが欠けてしまっている、もしくは存在していないことで起こる。また、欠損している錐体細胞の種類によって受け取れない範囲の波長の光が異なるうえ、錐体細胞の欠け方によって色の見え方の強弱が異なってくるため、同じ色覚多様性のタイプでも見え方に個人差が生じる[14][19][20]。このように色覚多様性のタイプは複数存在し、どのタイプかによって色の見え方も様々である。

このようなメカニズムで起こる色覚多様性は、明度が類似している色の識別が難しいという特性がある[20]。その特性を利用し、色覚異常の有無を検出する石原式色覚検査[21]や、標準擬似等色板 (SPP) 色覚検査[22][23]など、色覚多様性者の検出方法は様々存在する。またスマートフォンの普及に伴い、アプリケーションで行える色覚検査の開発[24]も行われている。しかし、ディスプレイ画面や印刷物、塗装など、色を映す媒体によって色覚多様性者の視認性は変化する[25]ことや、アプリケーションの有効性のさらなる検証が課題である[26]。

以上のように色覚多様性の特性は様々あり、複雑なものであるため、ゲーム内での色のハンディキャップをなくすためには、様々なパターンの色覚多様性の特性や色を写す媒体を十分に理解し、それぞれに適した色覚サポートを実装する必要がある。

2.1.2. 色覚シミュレーションに関する研究

色覚多様性者に対するバリアフリーとして、カラーユニバーサルデザイン (CUD) [27]という考えが提唱されている。カラーユニバーサルデザインとは、人間の色覚における多様性を考慮し、より多くの人に正しい情報が伝わるような配色を利用したデザインを行う

という考え方である。しかし、一般色覚者にとって色覚多様性者がどの色とどの色が識別しにくいのか、どういう場面で識別するのが困難なのかなどを理解できる機会が少ないため、普及率は低い[28]。

このように、色覚多様性者がどのように色が見えているかわからないという問題を解決するために、識別しにくい色の組み合わせの検出手法や色覚シミュレーション手法などの研究は多く存在する。Nakauchi ら[29]はカラーユニバーサルデザインの観点から色覚多様性のタイプのうち、P型（Protanope）とD型（Deuteranope）において識別しにくい色の検出を行い、識別しやすい色へ自動で修正する研究を行っている。しかし、修正後の色が周辺の色と組み合わせた場合、見えやすさが保たれていない場合もある。三末[30][31]は色空間や、色差といわれる色空間上における任意の色の座標ともう一つの任意の色の座標における距離の差の理解を促すツールや、色差を考慮したグラデーション生成ツールの開発を行っている。グラデーションで表現することによって、色差の移り変わりが視覚的に見えやすく、使用する色が適切な場面であるか検討することが可能である。また中内[32]やBrettelら[33]は、各色覚タイプにおけるディスプレイ上の色の見え方のシミュレーション手法を提案している。これは色を映す媒体によって色の見え方が異なることを踏まえた手法となっており、著者がシミュレーションしたい媒体がディスプレイであるため、参考にする。また、Color Oracle[34]や Adobe Photoshop[35]は色覚タイプに応じたディスプレイ全体の見え方をシミュレーションすることが可能である。これらの研究は、静止画でのシミュレーションを行っており、本研究で行うリアルタイムでの色変換とは異なる。

本研究ではディスプレイ上での色のシミュレーションをリアルタイムで行うため、浅田[36]の提案手法で使用した変換計算を参考にし、色のハンディキャップ改善に向けたシミュレーションを行う。

2.1.3. 色覚多様性者の支援に関する研究

色覚多様性者の治療法について、現在有効な治療法は見つかっていない。しかし、色覚多様性者の日常生活を支援する研究は様々行われている。

浅田[36]はカメラを通して見える映像について、色覚タイプごとに色の見え方をリアルタイムに変換するアプリケーションの開発を行った。これは普段身につけているスマートフォンを利用した手法であり、手軽さの面で優れている。このアプリケーションは一般色覚者にとって色覚多様性者がどのように見えているか疑似的に体験することができ、iTunes Store[37]にて寄せられたユーザレビューでは色覚に対する正しい認識を見せてくれるという意見などがあり、全体的に好意的な評価であった。また、Tanuwidjaja ら[38]は、ヘッドマウントディスプレイである Google Glass をベースに Chroma というシステムを開発した。Chroma とは、色覚タイプに応じて見える色を自動で変換することができるウェアラブル拡張実現システムである。しかし Google Glass の値段が高く、普段使いをするにはハ

ードルが高いという難点がある。また宮澤ら[39]は、カラーユニバーサルデザインのツールとして、世界で初めて光学模擬フィルタを開発した。この光学フィルタを用いて篠森ら[40]は印刷物において問題のある配色の発見や色変更の有効性について示唆した。このように色覚多様性者の日常生活を支援するシステムは様々開発されている。

色覚補正のシステム以外にも様々な支援が行われている。前川[41][42]は色を識別し、その色名を教えてくれるカラートークという携帯型装置の開発を行った。この装置は調べたい色に対して測定点から得られる RGB 値をセンサー部分で測定し、JIS 規格で定められている色名を音声で返すものである。こうした装置は意義深いものであるが、反射的に操作する必要があるリアルタイムゲームに利用することはできない。また、Ichikawa ら[43]は色覚多様性者に対する Web ページの色変更手法を提案している。この手法は Web ページ上の色を各階層に分解を行い、色空間上での位置関係から色の変更を行うアルゴリズムになっている。また、静止画像による色修正手法[44]も提案しており、色覚多様性者が識別しにくい色の程度の定量化を行い、全てのピクセルの色を変更することができる。

本研究では色覚多様性者自身を支援するだけでなく、一般色覚者にとって困難に感じるようなお互いの歩み寄りを可能とするシステムを通して色覚多様性者の支援を行う。

2.2. ゲームデザインに関する研究

ゲームデザインや UI が優れているとプレイヤーの満足度が高まる[45]。例えば、高齢者に向けた年齢に紐づいた機能制限を検討したゲームデザインの支援[46]や行動科学に基づいた健康のためのゲームデザイン[47]など、身体的に負荷がかかりすぎないように誰でも楽しむことができるコンテンツの制作や支援の研究は多くある。またゲーム制作側が自ら対策し、プレイヤーの支援につなげている例もある。Overwatch[48]はコミュニティを通じて、プレイヤーが思う不満や改善策を収集し、アクセシビリティ機能として追加していることが多い。このように改善することで、プレイヤーの満足度が向上している[49]。しかし、プレイヤーの意見がゲーム制作側に届くような場合でしか気づくことができない。またゲームデザインの支援に関する研究は高齢者の利用や健康を目的にしたものが多く、色覚に対するサポートの研究は少ない。この原因として色の見え方は主観でしか理解されず、異なった見え方をしてもどのような対策をすればプレイヤーの満足度が向上するかわかっていないことが挙げられる。

本研究では色覚多様性が持つ特性を踏まえて、特にオンラインゲームに特化したサポートを目指す。また、普段の生活でも応用可能な知見も得られることを目指す。

第3章 色覚間でのハンディキャップ制御を可能とする

組み合わせ色判定手法

3.1. 手法の概要

色覚多様性者が識別しやすい色である多様性識別容易色を様々なゲームに適応することで、本研究の目的である色のハンディキャップをなくすことにつながると考えられる。しかし多様性識別容易色を生成するためには、それぞれの色覚多様性者における識別容易色を調べ、その色の組み合わせが一般色覚者と比べて色覚多様性者の方がゲーム内で識別が容易か調査する必要がある。識別容易色という言葉は造語であり、本稿では識別しやすい色と定義する。例えば、多様性識別容易色という単語は「色覚多様性者が識別しやすく、一般色覚者が識別しにくい色」という意味になる。色覚多様性者の割合はその型によってはとても低く[19]、各色覚多様性者を集めて色に関する調査や実験を行うことは困難である。それに加えて、色の識別についてもその色同士が隣接しているのか、大きく離れているのか、また大きさはどれくらいなのか、さらに背景色は白なのか黒なのかそれ以外の色なのかなどや、色を見る際の照明の明るさや色、照明が差し込む角度により見え方が異なり、様々な状況や環境で影響が出ると考えられる。

そこで本研究では、一般色覚者に対し、それぞれの色覚タイプを模擬するフィルタを適用し、フィルタあり条件とフィルタなし条件との差を見ることで適切な色の組み合わせを得る手法を提案する。

3.2. 様々な色の表現法

模擬フィルタを再現するにあたり、いくつかのカラーモードを計算で使用する。カラーモードとは色の表現法のことであり、色覚模擬フィルタの再現においては RGB, CIEXYZ, LMS の3種類を使用する。この3種類のカラーモードについては全て色空間上に表現することが可能である。色空間[50]とは、色を三次元空間で表現したものであり、任意の色を座標に置き換えることができる色の表現手法である。例えば RGB の値が (255, 0, 0) の場合、色空間の x 軸の値が 255, y 軸と z 軸の値が 0 の座標の色、つまり赤色を表したものとなる。本節では、本研究で使用する RGB, CIEXYZ, LMS の3種類のカラーモードについて詳しく述べる。

3.2.1. RGB

RGB とは、赤 (Red), 緑 (Green), 青 (Blue) の3つの原色を混ぜることにより幅広い色を表現できるカラーモードである。赤 (Red), 緑 (Green), 青 (Blue) の3色は光

の三原色と呼ばれており、この光の三原色を混ぜていくことで明るくなることから、RGBは加法混合とも呼ばれている。このRGBは液晶ディスプレイやブラウン管、コンピュータやテレビなどの映像表示の際に使われているが、表示される媒体の環境によって実際に見える色は異なる。このRGBにおける色空間は Guild[51]が定義した。

3.2.2. CIEXYZ

CIEXYZとは、RGBでは表現することができない明度や彩度を表現することができるカラーモードのことを指す。このCIEXYZの色空間については Wright[52]が行った実験を元に、国際照明委員会(CIE)によって定義され、名前の由来となっている。X, Y, Zは混合する三原色の量を示す刺激値であり、Xは赤、Yは緑、Zは青にそれぞれ対応している。またX, Y, Zをまとめて三刺激値と呼び、光源の光の中に重なり合う青紫から赤までの可視光が、どういった割合で含まれているかを表した分光分布や、分光反射率を元に計算することが可能である。分光反射率とは、ある物質に光を照射したときの波長ごとの反射率のことである。

3.2.3. LMS

LMSとは、錐体細胞の反応に基づいて表現されるカラーモードである。人間が色を認識するメカニズムは、錐体細胞が任意の色においてそれぞれの波長を受け取り、受け取った波長の長さにより脳が色を認識している。人間の錐体細胞は3種類あり、LのLong波長、MのMedium波長、SのShort波長が存在する。この錐体細胞がどのように欠損しているかによって色覚タイプに違いが生じる[15]。この各錐体細胞で受け取ることができる波長は異なり、Lは赤の波長、Mは緑の波長、Sは青の波長の光を受け取ることができる。

本研究ではD型模擬フィルタの再現をするにあたり、色覚多様性のタイプが異なる原因となるLMSのカラーモードを用いて、一般色覚者の色の見え方からD型色覚多様性の色の見え方に変換する必要がある。

3.3. 色覚模擬フィルタ再現のための計算方法

画面上の任意の色のRGB値を色覚多様性者が見ている色のRGB値に変換し、色覚模擬フィルタを実現する。ここでは、浅田[36]が行った色の変換計算を参考に行う。変換計算の手順と色の変換の流れを図6に示す。

まずRGBの色空間を彩度や明度の情報を含んでいるCIEXYZの色空間に変換する。この理由として、色覚多様性の色の見え方は、彩度や明度によって変化するものであるが、RGBの色表現方法ではこれらの情報を考慮することができないためである。しかし、RGBはスクリーン上で自然な明るさに表示されるように補正された値であるため、補正前の値であるsRGBに変換した後に、CIEXYZの色空間への変換を行う。その後、CIEXYZの色空

間から色覚多様性のタイプが分かれる要因となる LMS に変換し、その変換した LMS の値に対し、それぞれの錐体応答値が欠損するような値に変換する。これにより、色覚多様性の錐体応答値を表現することが可能となる。その後、それぞれの錐体応答値を RGB 値に戻すため、錐体応答値である LMS から CIEXYZ, CIEXYZ から sRGB, sRGB から RGB の計算を再び行う。

計算した後のフィルタがかかった状態と、フィルタがかかっていない状態の画面を図 7 に示す。以下、①～⑦に詳しい計算式を示す。

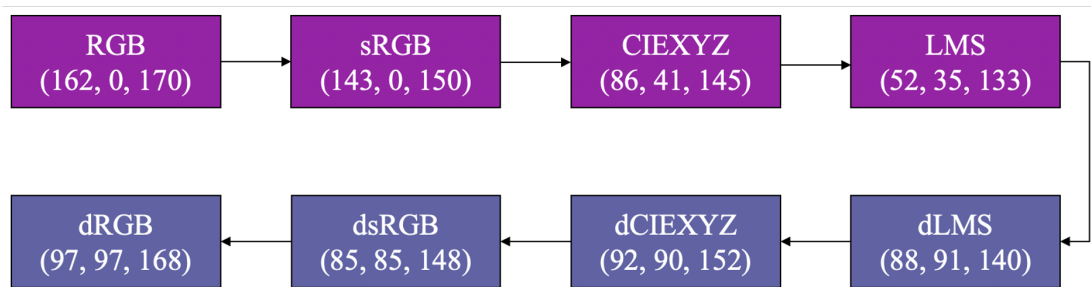


図 6 実験で用いるフィルタの色変換手順

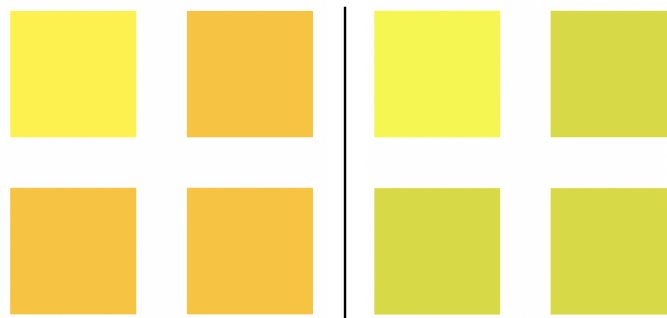


図 7 一般色覚色 (左) と D 型色覚色 (右)

① RGB から sRGB への変換

まず、変換したい任意の色の RGB を、彩度や明度を表現可能な CIEXYZ へ変換する。この変換を行うためには、RGB から sRGB に逆補正を行う必要がある。この RGB から sRGB への変換式を以下に示す。ここでの R, G, B は変換したい任意の色の RGB それぞれの値、R', G', B' は任意の色の RGB に対して逆補正を行った sRGB のそれぞれの値を示す (1)。

$$\begin{aligned}
 R' &= \frac{R}{255} \\
 G' &= \frac{G}{255} \\
 B' &= \frac{B}{255}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

次に、(1) で求めた R' 、 G' 、 B' の値によって、以下の計算 (2)、(3) を行い、sRGB を求める。

R' 、 G' 、 $B' \leq 0.04045$ の場合

$$\begin{aligned} R_{sRGB} &= \frac{R'}{12.92} \\ G_{sRGB} &= \frac{G'}{12.92} \\ B_{sRGB} &= \frac{B'}{12.92} \end{aligned} \quad (2)$$

R' 、 G' 、 $B' > 0.04045$ の場合

$$\begin{aligned} R_{sRGB} &= \left(\frac{R + 0.055}{1.055} \right)^{2.4} \\ G_{sRGB} &= \left(\frac{G + 0.055}{1.055} \right)^{2.4} \\ B_{sRGB} &= \left(\frac{B + 0.055}{1.055} \right)^{2.4} \end{aligned} \quad (3)$$

② sRGB から CIEXYZ への変換

sRGB から CIEXYZ へ、変換行列によって変換する (4)。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4124 & 0.357 & 0.1805 \\ 0.216 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9595 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{pmatrix} \quad (4)$$

③ CIEXYZ から LMS への変換

次に、CIEXYZ から LMS へ変換を行う (5)。

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.40024 & 0.70760 & -0.08081 \\ -0.22630 & 1.16532 & 0.04570 \\ 0 & 0 & 0.91822 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (5)$$

④ LMS から各色覚タイプの錐体応答値への変換

本研究では 3.1 節で述べたように、一般色覚者の見え方を色覚多様性者の見え方にするために、色覚多様性のタイプが分かれる要因となる LMS の値を変換行列によって変換させる。以下の式は、P 型の錐体応答値 (6-1)、D 型の錐体応答値 (6-2)、T 型の錐体応答値 (6-3) に変換する。

$$\begin{pmatrix} L_p \\ M_p \\ S_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1.05119 & -0.05115 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \quad (6-1)$$

$$\begin{pmatrix} L_d \\ M_d \\ S_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.95131 & 0 & 0.04866 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \quad (6-2)$$

$$\begin{pmatrix} L_t \\ M_t \\ S_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0.52543 & 1.52540 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \quad (6-3)$$

⑤ 各色覚タイプの錐体応答値 (LMS) から CIEXYZ へ変換

各色覚タイプの錐体応答値から、色のディスプレイ上での自然な明るさでの提示を考慮することができる色空間に変換する必要がある。よって、表示される媒体を考慮した色の表現をするため、各色覚タイプの錐体応答値である LMS から各色覚タイプの RGB 値に変換する必要がある。この変換は⑤～⑦であり、①～③の計算を逆順に行う。

まず、LMS から CIEXYZ に変換する (7-1) (7-2) (7-3)。

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.85995 & -1.129939 & 0.21990 \\ 0.36119 & 0.63881 & 0 \\ 0 & 0 & 1.08906 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_p \\ M_p \\ S_p \end{pmatrix} \quad (7-1)$$

$$\begin{pmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.85995 & -1.129939 & 0.21990 \\ 0.36119 & 0.63881 & 0 \\ 0 & 0 & 1.08906 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_d \\ M_d \\ S_d \end{pmatrix} \quad (7-2)$$

$$\begin{pmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.85995 & -1.129939 & 0.21990 \\ 0.36119 & 0.63881 & 0 \\ 0 & 0 & 1.08906 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_t \\ M_t \\ S_t \end{pmatrix} \quad (7-3)$$

⑥ CIEXYZ から sRGB へ変換

各色覚タイプの模擬フィルタをかけた状態の色空間で表現された CIEXYZ から sRGB に変換する (8-1) (8-2) (8-3)。

$$\begin{pmatrix} R_{psRGB} \\ G_{psRGB} \\ B_{psRGB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2406 & -1.12939 & -0.4986 \\ -0.9689 & 1.8758 & 0.0415 \\ 0.0557 & -0.2040 & 1.0570 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} \quad (8-1)$$

$$\begin{pmatrix} R_{dsRGB} \\ G_{dsRGB} \\ B_{dsRGB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2406 & -1.12939 & -0.4986 \\ -0.9689 & 1.8758 & 0.0415 \\ 0.0557 & -0.2040 & 1.0570 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \end{pmatrix} \quad (8-2)$$

$$\begin{pmatrix} R_{tsRGB} \\ G_{tsRGB} \\ B_{tsRGB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2406 & -1.12939 & -0.4986 \\ -0.9689 & 1.8758 & 0.0415 \\ 0.0557 & -0.2040 & 1.0570 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{pmatrix} \quad (8-3)$$

⑦ sRGB から RGB への変換

最後に、RGB から sRGB への補正変換を行い、sRGB の値によって D 型模擬フィルタをかけた状態の RGB 値を算出する (9) (10) .

$R_{dsRGB}, G_{dsRGB}, B_{dsRGB} \leq 0.0031308$ の場合

$$\begin{aligned} R'_{dsRGB} &= 12.92R_{dsRGB} \\ G'_{dsRGB} &= 12.92G_{dsRGB} \\ B'_{dsRGB} &= 12.92B_{dsRGB} \end{aligned} \quad (9)$$

$R_{dsRGB}, G_{dsRGB}, B_{dsRGB} > 0.0031308$ の場合

$$\begin{aligned} R'_{dsRGB} &= 1.055R_{dsRGB}R_{dsRGB}^{\frac{1.0}{2.4}} - 0.055 \\ G'_{dsRGB} &= 1.055G_{dsRGB}G_{dsRGB}^{\frac{1.0}{2.4}} - 0.055 \\ B'_{dsRGB} &= 1.055B_{dsRGB}B_{dsRGB}^{\frac{1.0}{2.4}} - 0.055 \end{aligned} \quad (10)$$

その後、D 型模擬フィルタに変換された sRGB を RGB に変換する (11) .

$$\begin{aligned} R_d &= 255R'_{dsRGB} \\ G_d &= 255G'_{dsRGB} \\ B_d &= 255B'_{dsRGB} \end{aligned} \quad (11)$$

第4章 両者間の2色における識別しやすい色の調査

4.1. プレ実験

4.1.1. 実験概要

本研究では色覚多様性者がゲームをプレイする際の色のハンディキャップをなくすために、色覚多様性者が識別しやすく、一般色覚者が識別しにくい色（以下、D型における多様性識別容易色とする）を調査する必要がある。なお色覚多様性者には様々なタイプがあるため、本研究では割合の多いD型色覚者[18]を対象とする。

ここで、山中ら[53]の研究より色覚多様性者の Web 上における文字色の視認性は、文字色と背景色の明度の差が大きいほど高くなることが明らかになっている。このことより、調査する D 型における多様性識別容易色は、明度の差がある色の組み合わせではないかと考える。そこで、「色覚多様性者が正確、かつ速く色の違いを判断することができる色の組み合わせは、明度の差が大きい色の組み合わせである」という仮説をたて、その仮説について検証する実験を行う。そのためまず、本実験で使用する色の組み合わせの選定を目的としたプレ実験を行う。

そこで、6×6に並べた正方形のうち1つだけ異なる色に変化させた視覚刺激を提示し、その中で色が異なると思う四角形を1つ素早く選択してもらった実験を行う。この1つだけ異なる色を標的色、その他の選択肢の色を基本色とし、この標的色と基本色のペアに対し、3章で述べた色覚多様性者が見えているとされる色に擬似的に変換するフィルタを用いた、実際に実験で提示した例を図8に示す。また、プレ実験で用いる標的色と基本色の組み合わせ22通りについては表1に示す。この色の組み合わせは山中ら[53]の研究結果をもとに選定した。また1つの色の組み合わせにおいて、フィルタあり条件とフィルタなし条件の両方について実験を行う。3.1節でも述べたとおり、本システムを用いた実験協力者を一般色覚者に限定したため、D型模擬フィルタを用いることで色覚多様性者の見え方を再現[36]する。

実験では（色の組み合わせ22通り）×（フィルタありとなしの2条件）=44試行を1回分とし、合計10回行った。1試行につき、正解不正解に関わらず、1度クリックしたものが標的色でなかった場合でも、次の試行に進むような設計になっている。その際、試行の提示が始まってから実験協力者に6×6のものの中から標的をマウスでクリックするまでの時間を取得する。

プレ実験の実験協力者は、一般色覚者5名（男性2名、女性3名）である。実験協力者にはあらかじめ石原式色覚検査表に基づいて色覚チェック[18][54]を行い、実験協力者全員が色覚多様性者ではないということを確認した。また実験における諸注意として、身体と

ディスプレイを50cm離すこと、実験中は身体を前のめりにしないこと、正確性を優先に選択を行うことの3点を実験協力者に事前に伝えた。

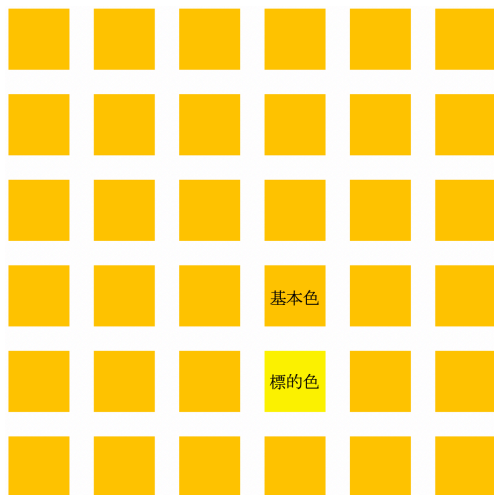


図8 標的色と基本色の例

表1 プレ実験で使った色の組み合わせ (RGB) とフィルタありなし条件での正答率と平均回答時間

	標的色	基本色	実際の色		フィルタ適用		なし条件 正答率	あり条件 正答率	なし条件 平均回答時間	あり条件 平均回答時間	本実験
			標的色	基本色	標的色	基本色					
pair-A	255, 70, 70	255, 100, 80	赤	赤	黄緑	黄緑	0.96	0.50	3.06	11.73	
pair-B	255, 100, 80	255, 70, 70	赤	赤	黄緑	黄緑	0.98	0.44	3.50	12.34	
pair-C	255, 100, 30	0, 90, 40	橙	緑	黄緑	黒	1.00	1.00	1.02	1.00	
pair-D	0, 90, 40	255, 100, 30	緑	橙	黄緑	黄緑	1.00	1.00	1.00	1.07	
pair-E	205, 75, 100	196, 100, 94	赤	赤	黄緑	黄緑	0.98	0.54	1.63	10.85	
pair-F	196, 100, 94	205, 75, 100	赤	赤	黄緑	黄緑	1.00	0.82	1.74	7.58	
pair-G	90, 64, 89	98, 55, 85	紫	紫	黄緑	黒	1.00	0.14	2.92	16.68	○
pair-H	98, 55, 85	90, 64, 89	紫	紫	黄緑	黒	0.98	0.24	2.11	14.54	○
pair-I	171, 30, 85	164, 38, 92	紫	紫	黄緑	黒	0.92	0.90	7.80	5.22	
pair-J	164, 38, 92	171, 30, 85	紫	紫	黄緑	黒	0.62	0.86	14.74	8.27	
pair-K	116, 54, 179	136, 0, 204	紫	紫	黄緑	黄緑	0.94	0.66	3.06	8.03	
pair-L	136, 0, 204	116, 54, 179	紫	紫	黄緑	黄緑	1.00	0.92	1.91	5.77	
pair-M	77, 0, 0	102, 10, 10	黒	黒	黄緑	黄緑	1.00	0.98	2.11	4.90	
pair-N	102, 10, 10	77, 0, 0	黒	黒	黄緑	黄緑	1.00	0.96	1.55	3.43	
pair-O	64, 175, 255	0, 184, 240	青	青	黄緑	黄緑	0.96	0.64	2.85	9.24	
pair-P	0, 184, 240	64, 175, 255	青	青	黄緑	黄緑	0.96	0.24	2.60	14.37	
pair-Q	154, 227, 82	141, 217, 98	黄緑	黄緑	黄緑	黄緑	0.92	0.90	4.36	4.46	○
pair-R	141, 217, 98	154, 227, 82	黄緑	黄緑	黄緑	黄緑	0.94	0.84	7.28	6.36	○
pair-S	230, 138, 184	232, 139, 190	紫	紫	黄緑	黄緑	0.10	0.88	15.58	7.70	○
pair-T	232, 139, 190	230, 138, 184	紫	紫	黄緑	黄緑	0.20	0.76	13.95	9.46	○
pair-U	152, 217, 207	145, 235, 211	青	青	黄緑	黄緑	0.98	0.94	2.65	3.42	
pair-V	145, 235, 211	152, 217, 207	青	青	黄緑	黄緑	0.96	1.00	2.17	3.27	

4.1.2. プレ実験の結果・考察

プレ実験より色の組み合わせにおけるフィルタあり条件とフィルタなし条件での正答率の結果を表1に示す。

表1から、pair-Sやpair-Tのようにフィルタあり条件の方がフィルタなし条件よりも正答率が高い色の組み合わせについては、D型色覚多様性者の見えている色の方が一般色覚者の見えている色より正確に色を捉えられていることになる。そのため、D型における多様性識別容易色として適切であると考えられる。一方、pair-Uやpair-Vのようにフィルタあり条件とフィルタなし条件のどちらにおいても正答率が高い組み合わせは公平な色のペアであると考え、フィルタあり条件とフィルタなし条件で回答時間に差が生じた場合には、それによりハンディキャップの制御が可能になると期待される。

pair-Cとpair-Dの色の組み合わせに関しては不正解者がおらず、また実験後のインタビューで「pair-Cやpair-Dはどちらの条件でも明らかに色が違い、簡単だった」という意見が多くあったため、公平な色と考え、今回は除外した。その結果、除外されなかったpair-G, pair-H, pair-Q, pair-R, pair-S, pair-Tを明度差が大きい色の組み合わせとして定める。「色覚多様性者が正確、かつ速く色の違いを判断することができる色の組み合わせは、明度の差が大きい色の組み合わせである」という本研究の仮説を検証するため、本実験ではこの6通りの色の組み合わせを使用する(表1)。

4.2. 本実験

4.2.1. 実験概要

本実験でも、「色覚多様性者が正確、かつ速く色の違いを判断することができる色の組み合わせは、明度の差が大きい色の組み合わせである」という仮説をもとに、提案システムを用いてプレ実験と同様に6×6に並べた正方形の中にある1つだけ異なる色を素早く選択してもらうという実験を行う。またプレ実験より、明度が低い色の組み合わせほど色覚多様性者の正答率が低く、多様性識別容易色に適していないと考えられる。そのため、ある程度明度が高い色の組み合わせから、多様性識別容易色を調査する必要があると考え、プレ実験の結果より選定した6通りと明度が高い色の組み合わせを22通り追加した。つまり本実験では、計28通りの色の組み合わせについて実験を行う。本実験で使用した色の組み合わせを表2に示す。

本実験もプレ実験と同様、事前に色覚チェックを行い、プレ実験の実験協力者とは異なる一般色覚者13名(男性5名、女性8名)を実験協力者とした。また、1つの色の組み合わせにおいて、フィルタあり条件とフィルタなし条件の両方において実験を行う。よって

実験では、（色の組み合わせ28通り）×（フィルタありとなしの2条件）=56試行を1回分とし、全部で10回行った。

表2 本実験で使用した色の組み合わせ（RGB）と
フィルタありなし条件での正答率と平均回答時間

	標的色	基本色	実際の色		フィルタ適用		なし条件 正答率	あり条件 正答率	なし条件 回答時間	あり条件 回答時間
			標的色	基本色	標的色	基本色				
pair-1	171, 145, 0	204, 167, 0					0.99	0.95	1.35	1.59
pair-2	204, 167, 0	171, 145, 0					0.98	1.00	1.42	1.68
pair-3	171, 30, 85	164, 38, 92					0.74	0.80	6.50	5.09
pair-4	164, 38, 92	171, 30, 85					0.72	0.81	5.99	7.47
pair-5	165, 0, 171	180, 0, 204					0.88	0.95	2.97	2.13
pair-6	180, 0, 204	165, 0, 171					0.88	0.94	2.62	1.85
pair-7	230, 138, 184	232, 139, 190					0.15	0.68	10.14	7.20
pair-8	232, 139, 190	230, 138, 184					0.38	0.62	14.75	6.61
pair-9	90, 64, 89	98, 55, 85					0.98	0.36	2.29	12.26
pair-10	98, 55, 85	90, 64, 89					0.98	0.25	1.82	13.20
pair-11	0, 180, 147	0, 210, 167					1.00	0.98	1.82	1.71
pair-12	0, 210, 167	0, 180, 147					0.96	0.95	2.36	2.21
pair-13	154, 227, 82	141, 217, 98					0.83	0.94	3.30	2.90
pair-14	141, 217, 98	0, 210, 167					0.82	0.83	3.56	3.83
pair-15	199, 35, 230	172, 49, 185					0.93	0.97	1.94	2.01
pair-16	172, 49, 185	199, 35, 230					0.97	0.99	1.76	1.54
pair-17	145, 165, 0	135, 168, 0					0.93	0.02	2.84	33.72
pair-18	135, 168, 0	145, 165, 0					0.97	0.05	2.96	7.62
pair-19	0, 0, 168	0, 2, 143					0.91	0.92	2.86	2.91
pair-20	0, 2, 143	0, 0, 168					0.84	0.79	4.78	4.57
pair-21	186, 0, 112	180, 30, 105					0.50	0.56	8.99	9.53
pair-22	180, 30, 105	186, 0, 112					0.33	0.53	11.84	9.49
pair-23	0, 157, 168	0, 149, 161					0.59	0.37	7.74	9.77
pair-24	0, 149, 161	0, 157, 168					0.29	0.47	10.17	8.08
pair-25	99, 94, 0	115, 101, 0					0.97	0.71	2.32	7.27
pair-26	115, 101, 0	99, 94, 0					0.98	0.75	1.93	5.03
pair-27	115, 0, 0	99, 0, 0					0.97	0.84	2.80	5.33
pair-28	99, 0, 0	115, 0, 0					0.83	0.60	4.13	7.36

表3 12名分の正答率と平均回答時間

	正答率	平均回答時間(秒)
全体	0.75	6.27
フィルタあり	0.70	7.29
フィルタなし	0.80	5.26

4.2.2. 本実験の結果

実験結果を分析するにあたり、正答率と回答時間の両方における外れ値 (mean±2SD) をとる実験協力者が1名いたため、その数値を除外した12名 (男性5名, 女性7名) の実験結果を採用する。

表3に全体、フィルタあり条件、フィルタなし条件における実験協力者12名の正答率と平均回答時間を示す。表3より、全体の正答率については、フィルタあり条件が0.70、フィルタなし条件が0.80となり、フィルタなし条件の正答率が高くなった。また全体の平均回答時間については、フィルタあり条件が7.29秒、フィルタなし条件が5.26秒となり、フィルタなし条件の平均回答時間が速くなった。

次に、色の組み合わせごとに分析を行う。表2に色の組み合わせごとにおける実験協力者12名分の正答率を示す。フィルタあり条件とフィルタなし条件の正答率について対応のあるt検定を行ったところ、28通りの色の組み合わせのうち、pair-5, pair-8, pair-13, pair-24, pair-27の5通りについて有意差 ($p < 0.05$) が見られ、pair-7, pair-9, pair-10, pair-17, pair-18, pair-22, pair-23, pair-25, pair-26, pair-28の10通りについて有意差 ($p < 0.01$) が見られた。有意差が見られた15通りの中で、フィルタなし条件よりもフィルタあり条件の正答率が高い色の組み合わせはpair-5, pair-7, pair-8, pair-13, pair-22, pair-24の6通りであった。

最後に、フィルタあり条件とフィルタなし条件で回答時間について対応のあるt検定を行ったところ、色の組み合わせ28通りのうち4通りについて有意差 ($p < 0.05$)、15通りについて有意差 ($p < 0.01$) が見られた。有意差が見られた19通りの中で、フィルタなし条件よりフィルタあり条件の方が、平均回答時間が短い色の組み合わせはpair-3, pair-6, pair-7, pair-8, pair-14, pair-24の6通りであった。

4.2.3. 考察

本研究では、ゲームプレイにおける色のハンディキャップを埋めることを目的とし、「色覚多様性者が正確、かつ速く色の違いを判断することができる色の組み合わせは、明度の差が大きい色の組み合わせである」という仮説をもとに、D型における多様性識別容易色を見つける実験を行った。ここで、ゲームで勝利するためには、素早く正確に色を判断することが必要になる。そのため、本実験で得られた結果からどちらの条件においても正答率が0.7以上であり、また平均回答時間が6秒以下である色の組み合わせに限定して考察を行う。これらの条件に当てはまる色の組み合わせの平均回答時間を図9, 10に示す。ここで図9はフィルタなし条件における平均時間が短い色の組み合わせであり、図10はフィルタあり条件における平均時間が短い色の組み合わせである。また図の縦軸は平均回答時間であり、横軸は色の組み合わせである。これらの色の組み合わせの中で、特に平均回

答時間の差が大きかった pair-5, pair-6, pair-26, pair-27 と特に平均回答時間の差が見られなかった pair-11 と pair-15 について考察を行う。

pair-5 と pair-6 は、表 2 と図 10 より正答率はどちらの条件においても 0.85 以上であり、平均回答時間はフィルタあり条件の方がフィルタなし条件より短いことがわかる。ここで、これらの色の組み合わせが多様性識別容易色として適しているか考察を行うため、pair-5 と pair-6 の RGB を色覚多様性者が色を識別する際の手がかりとなる HSV に変換する。HSV は色相 (Hue) , 彩度 (Saturation) , 明度 (Value, Brightness) の 3 つの成分からなる色空間である。ここで、本章で考察を行う色の組み合わせについて RGB を HSV の色空間に変換した結果を表 4 に示す。表 4 より、フィルタあり条件とフィルタなし条件それぞれについて標的色と基本色の HSV を比較すると、pair-5 と pair-6 の 2 つの条件の間で標的色と基本色の明度の差は等しいが、彩度差に違いが生じていることがわかる。一方で、フィルタなし条件における HSV では、標的色と基本色の間で色相の値にわずかな差が生じていた。これらの結果より、フィルタあり条件において D 型色覚者の方が識別しやすい要素として、彩度と明度の値に差があり、かつ色相の値が同じであることが重要だと考えられる。このことについて、明度の差が大きいほど色覚多様性者が識別しやすいという先行研究[53]の結果と一致する。しかし、正答率に 6~7% の違いがあるため、この差がもう少し縮まることが望ましい。

次に pair-26 と pair-27 については、図 9 よりフィルタなし条件の方がフィルタあり条件よりも平均回答時間が短い組み合わせであることがわかる。また表 4 より、フィルタあり条件とフィルタなし条件のどちらにおいても、標的色の明度が基本色の明度に比べて高いことがわかる。ここで多様性識別容易色として適している色は、フィルタの有無に関わらず正確に識別ができ、フィルタなし条件よりフィルタあり条件の回答時間が短い色であると

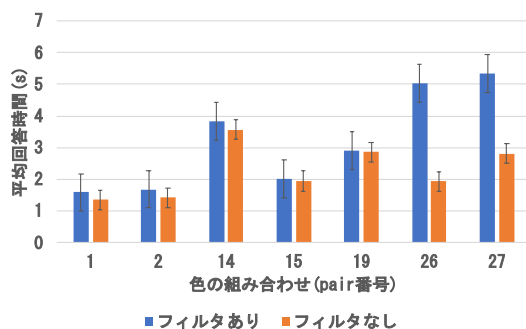


図9 フィルタなし条件における平均回答時間が短い色の組み合わせ

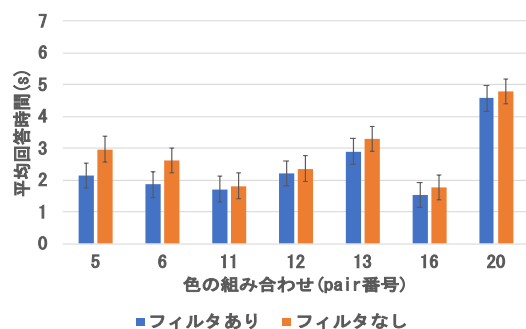


図10 フィルタあり条件における平均回答時間が短い色の組み合わせ

考える。しかし、pair-26とpair-27についてはフィルタなし条件の方が、平均回答時間が短いことから多様性識別容易色として適していないことがわかる。

pair-11とpair-15は、図9、10よりフィルタあり条件とフィルタなし条件の間で平均回答時間に差があまり見られなかった。つまりpair-11とpair-15については多様性識別容易色と一般識別容易色の中間として、一般色覚者と色覚多様性者の間に存在する色のハンディキャップの難易度を制御することができるのではないかと考える。しかし、明度の差が大きいことが顕著に影響しているとは言えない結果となった。

以上の結果より、D型色覚多様性者視点において、注目したい色の明度が周りの色の明度より低い、または同じである場合は色覚多様性者の見えている色の視認性が高いことが明らかになった。この結果から「色覚多様性者が正確、かつ速く色の違いを判断することができる色の組み合わせは、明度の差が大きい色の組み合わせである」という仮説が支持され、色覚多様性者にとって一般色覚者より識別可能である多様性識別容易色の要素として明度の差が重要であることがわかった。また、注目したい色の明度が周りの色の明度と比べて値が高い場合、一般色覚者と色覚多様性者の両者にとって識別しやすい公平色があることがわかった。

表5は一般色覚者、D型色覚多様性者それぞれにおいて有利不利になる色の組み合わせを示す。pair-Cとpair-Dはプレ実験で使用した色の組み合わせである。

表4 フィルタありなし条件でのHSV

	標的色 フィルタなし	基本色 フィルタなし	標的色 フィルタあり	基本色 フィルタあり
pair-5	297, 100, 67	292, 100, 80	240, 42, 66	240, 46, 79
pair-6	292, 100, 80	297, 100, 67	240, 46, 79	240, 42, 66
pair-11	169, 100, 70	167, 100, 82	60, 0, 58	60, 2, 68
pair-15	290, 84, 90	294, 73, 72	240, 46, 89	240, 39, 71
pair-26	52, 100, 45	56, 100, 38	60, 100, 41	60, 100, 37
pair-27	0, 100, 45	0, 100, 38	60, 100, 26	60, 100, 22

表5 一般色覚者とD型色覚多様性者間における有利不利な色の組み合わせ

	一般有利	一般不利
D型有利	pair-C, pair-D pair-11, pair-15	pair-5, pair-6
D型不利	pair-25, pair-26	pair-19

4.2.4.2 色間における識別容易色の調査のまとめ

4章では色覚多様性者がゲームをプレイする際に感じる色のハンディキャップをなくすことを目的とし、「色覚多様性者が正確、かつ速く色の違いを判断することができる色の組み合わせは、明度の差が大きい色の組み合わせである」という仮説を元に、D型色覚多様性における多様性識別容易色があるかについて調査を行った。具体的には、選択肢の中で1つだけ異なる色を選択してもらった実験を行い、一般色覚者をD型色覚多様性者の見え方に変換するD型模擬フィルタをかけて行うフィルタあり条件とフィルタなし条件の結果を比較した。

実験の結果より、多様性識別容易色として、明度の差だけでなく、彩度の値に差がありかつ色相の値が同じである色の組み合わせが適していることが示唆された。

しかし、調査しきれていない多様性識別容易色に適している明度差の範囲の明確化はまだ行えていない。また、実験設計では標的色と基本色の2色間における調査のみしか行っていない。ゲーム環境を考慮するためには背景色も含めた同様の実験を行う必要がある。しかし、いきなり様々な色を混ぜた実験を行うとどのような要因が存在するのか言語化することが難しいと考えられる。そこで5章では4章で行った実験に加え、背景色を考慮した3色を用いた実験を行う。

第5章 背景色を考慮した両者間の2色における識別しやすい色の調査

5.1. 実験

5.1.1. 実験概要






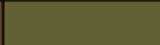




5章では、4章で述べた「色覚多様性者が正確、かつ速く色の違いを判断することができる色の組み合わせは、明度の差が大きい色の組み合わせである」という仮説をもとに実験を行う。また4章で使用した色の組み合わせに加え、浅田[36]が行っていた実験を参考に、明度が高い色の組み合わせを18通り追加した。そのため、実験では計30通りの色の組み

表6 実験で使用した色の組み合わせ (RGB)

	標的色	基本色	実際の色		フィルタ適用	
			標的色	基本色	標的色	基本色
pair-1	204, 167, 0	171, 145, 0				
pair-2	171, 145, 0	204, 167, 0				
pair-3	180, 0, 204	165, 0, 171				
pair-4	165, 0, 171	180, 0, 204				
pair-5	0, 210, 167	0, 180, 147				
pair-6	0, 180, 147	0, 210, 167				
pair-7	141, 217, 98	154, 227, 82				
pair-8	154, 227, 82	141, 217, 98				
pair-9	172, 49, 185	199, 35, 230				
pair-10	199, 35, 230	172, 49, 185				
pair-11	0, 2, 143	0, 0, 168				
pair-12	0, 0, 168	0, 2, 143				
pair-13	115, 101, 0	99, 94, 0				
pair-14	99, 94, 0	115, 101, 0				
pair-15	99, 0, 0	115, 0, 0				
pair-16	115, 0, 0	99, 0, 0				
pair-17	0, 90, 40	255, 100, 30				
pair-18	255, 100, 30	0, 90, 40				
pair-19	185, 159, 52	220, 117, 62				
pair-20	220, 117, 62	185, 159, 52				
pair-21	175, 190, 194	183, 156, 189				
pair-22	183, 156, 189	175, 190, 194				
pair-23	148, 102, 118	55, 126, 83				
pair-24	55, 126, 83	148, 102, 118				
pair-25	196, 201, 82	244, 185, 89				
pair-26	244, 185, 89	196, 201, 82				
pair-27	235, 70, 196	255, 64, 255				
pair-28	255, 64, 255	235, 70, 196				
pair-29	130, 111, 105	140, 55, 100				
pair-30	140, 55, 100	130, 111, 105				

合わせについて実験を行う。本実験で使用した色の組み合わせを表6に示す。また、使用した背景色を表7に示す。背景色の選定については著者がゲームをプレイしており、よく使われている背景色を選定した。

表7 実験で使用した背景色 (RGB)

	背景色	実際の色	フィルタ適用
緑	86, 170, 49		
青	26, 50, 200		
茶色	120, 83, 54		
オレンジ	241, 156, 68		
灰色	132, 132, 132		

本実験では一般色覚者14名(男性6名, 女性8名)を実験協力者とした。また, 1つの色の組み合わせにおいて, フィルタあり条件とフィルタなし条件の両方において実験を行う。そのため本実験では, (1条件あたり色の組み合わせ30通り) × (フィルタありとなしの2条件) × (背景色5通り) = 300試行を1セットとし, 全部で6セット行ってもらった(計1800試行)。実験設計は4.1.1項でも述べたように, 1試行につき, 正解不正解に関わらず, 1度選択を行った場合には次の試行に進むような設計になっている。その際, 試行の提示が始まってから実験協力者が6×6の選択肢の中から標的をマウスでクリックするまでの時間を取得する。クリックしたものが標的色でなかった場合でも, 次の試行に進むようになっている。実験における諸注意として, 身体とディスプレイを50cm離すこと, 実験中は身体を前のめりにしないことの2点を実験協力者に事前に伝えた。なお, 6セットのうち3セットは迷わずに速さを重視した選択(fast条件)を行うよう指示し, 残りの3セットでは正確さを重視した選択(correct条件)を行うように指示をした。実験画面の例を図11に示す。

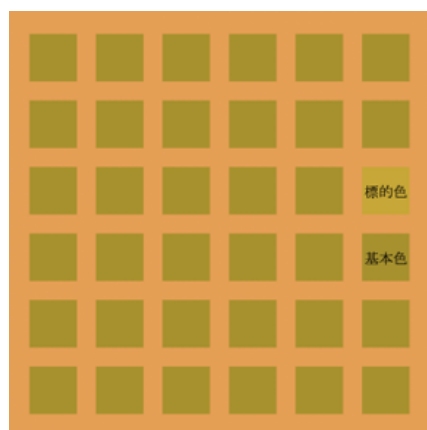


図11 標的色と基本色と背景色の例

5.1.2. 実験結果

実験結果を分析するにあたり，色の組み合わせごとの回答時間における外れ値 (mean±2SD) を1名除外した。

表8には全体，フィルタあり条件，フィルタなし条件における実験協力者14名の平均回答時間を，表9には正答率を示す。全体の平均回答時間については，フィルタあり条件が2.72秒，フィルタなし条件が1.56秒となり，フィルタなし条件の方が短い時間で回答していた(表8)。また全体の正答率については，フィルタあり条件が0.80，フィルタなし条件が0.92となり，フィルタなし条件の方が高くなった(表9)。

表8 14名分の平均回答時間(秒)

	all	fast	correct
全体	2.14	1.61	2.67
フィルタあり	2.72	1.83	3.61
フィルタなし	1.56	1.39	1.73

表9 14名分の正答率

	all	fast	correct
全体	0.86	0.80	0.92
フィルタあり	0.80	0.73	0.87
フィルタなし	0.92	0.86	0.97

ここでは，色の組み合わせごとに分析を行う。表10は色の組み合わせごとにおける実験協力者14名分の平均回答時間を，表11は色の組み合わせごとにおける実験協力者14名分の正答率を示す。フィルタあり条件はD型模擬フィルタをかけた色で，フィルタなし条件は一般色覚者が見ている色である。また，緑色のセルは平均回答時間が1秒以下の良い結果を，赤色のセルは平均回答時間が3秒以上の悪い結果を示す。

また表11の緑色のセルは正答率が0.96以上の良い結果を，赤色のセルは正答率が0.05以下の悪い結果を示す。

5.2. 考察

ゲームプレイにおける色のハンディキャップを埋めることを目的とし、「色覚多様性者が正確、かつ速く色の違いを判断することができる色の組み合わせは、明度の差が大きい色の組み合わせである」という仮説をもとに、識別容易色を見つける実験を行った。ここで、ゲームにおける公平性を保つためには、一般色覚者と色覚多様性者の両者にとって識別する時間が近い色の組み合わせが適切になる。そこで、素早く回答してもらった3回の試行におけるフィルタあり条件とフィルタなし条件における平均回答時間の差を見るために、選択を行った方の結果における色の組み合わせごとの（フィルタあり条件の平均回答時間）÷（フィルタなし条件の平均回答時間）の値を表12に示す。緑色のセルは値が0.95以上1.05以下の差が少ない結果を示す。

表12 平均回答時間における(あり条件)÷(なし条件)の割合

	背景色				
	緑	青	茶	オレンジ	グレー
pair-1	0.957	1.070	0.946	0.914	0.995
pair-2	0.888	0.951	1.136	0.985	1.093
pair-3	0.516	0.609	0.574	0.644	0.613
pair-4	0.667	0.560	0.907	0.767	0.644
pair-5	0.903	0.820	0.689	0.773	0.535
pair-6	0.812	0.720	0.655	0.769	0.721
pair-7	0.881	1.098	0.913	0.555	1.369
pair-8	0.867	1.001	1.002	0.634	1.008
pair-9	0.779	0.621	0.796	0.717	0.892
pair-10	0.700	0.689	0.993	0.589	0.830
pair-11	0.890	0.938	0.838	1.003	1.250
pair-12	0.833	0.799	0.941	1.070	1.152
pair-13	1.187	0.883	1.149	1.061	1.443
pair-14	1.126	1.118	1.166	0.947	1.561
pair-15	0.904	0.921	0.931	0.861	0.964
pair-16	1.290	0.943	1.219	1.321	1.086
pair-17	1.010	1.011	1.119	1.114	0.980
pair-18	1.056	1.002	1.055	1.023	1.017
pair-19	1.696	4.268	3.451	3.064	3.150
pair-20	2.662	4.143	3.365	2.562	3.920
pair-21	1.158	2.836	1.700	1.075	1.262
pair-22	1.366	2.263	1.498	1.103	1.371
pair-23	1.183	1.680	1.250	1.254	1.339
pair-24	1.359	1.567	1.860	1.502	1.220
pair-25	3.074	4.065	4.099	2.561	3.560
pair-26	4.453	4.472	4.344	2.101	3.684
pair-27	3.946	4.553	3.654	3.604	3.611
pair-28	3.664	4.353	3.632	3.336	3.574
pair-29	1.310	1.114	1.051	1.497	1.087
pair-30	1.224	1.416	1.078	1.539	1.170

0.95以上1.05以下の差が少ない組み合わせを抽出した結果、背景色が緑色の場合は2パターン、青色の場合は4パターン、茶色の場合は2パターン、オレンジの場合は3パターン、灰色の場合は5パターンとなった。これらの色の組み合わせは、両者ともに識別するのにかかった時間に差がなく、ゲーム内で反応するスピードの平等性が保てるのではないかと考えられる。

これらの色についてさらに考察する。表13は表12に示してある回答時間の差が少ない色の組み合わせにおけるフィルタ有無条件それぞれのHSVを示している。HSVとは色相(Hue)、彩度(Saturation)、明度(Value, Brightness)の3つの成分からなる色空間のことである。

表13 表12の緑色のセルにおける色のHSV

	標的色 フィルタなし	基本色 フィルタなし	背景色 フィルタなし	標的色 フィルタあり	基本色 フィルタあり	背景色 フィルタあり
pair-8	90, 64, 89	98, 55, 85	232, 87, 78	60, 58, 81	60, 48, 77	240, 79, 78
	90, 64, 89	98, 55, 85	26, 55, 47	60, 58, 81	60, 48, 77	60, 47, 38
	90, 64, 89	98, 55, 85	0, 0, 52	60, 58, 81	60, 48, 77	0, 0, 52
pair-11	239, 100, 56	240, 100, 66	31, 72, 95	240, 99, 56	240, 100, 65	60, 69, 74
pair-15	0, 100, 39	0, 100, 45	0, 0, 52	60, 100, 22	60, 100, 26	0, 0, 52
pair-17	147, 100, 35	19, 88, 100	102, 71, 67	60, 42, 29	60, 100, 67	60, 63, 58
	147, 100, 35	19, 88, 100	232, 87, 78	60, 42, 29	60, 100, 67	240, 79, 78
	147, 100, 35	19, 88, 100	0, 0, 52	60, 42, 29	60, 100, 67	0, 0, 52
pair-18	19, 88, 100	147, 100, 35	232, 87, 78	60, 100, 67	60, 42, 29	240, 79, 78
	19, 88, 100	147, 100, 35	31, 72, 95	60, 100, 67	60, 42, 29	60, 69, 74
	19, 88, 100	147, 100, 35	0, 0, 52	60, 100, 67	60, 42, 29	0, 0, 52

色覚多様性者にとって明度の差がある色の組み合わせは識別することが可能であるが、明度の差がない色の組み合わせは識別することが困難になる[20]。また4章でも述べたように、明度の値の差だけでなく彩度の値に差がある色の組み合わせが識別しやすいことが示唆された。これらのことから、pair-8の背景色が青色や灰色のような明度と彩度の差が大きい色の組み合わせは、両者にとって識別しやすいということがわかる。また、pair-11やpair-15のような基本色と標的色の彩度の値が同じ色の組み合わせにおいては、基本色と標的色と背景色の明度の値の差がある場合に識別しやすい結果になった。これらの結果より、基本色と標的色と背景色の明度の値に差があれば、彩度の値が同じ場合でも、両者にとって識別する速さが変わらないことが明らかになった。

さらにpair-8において、良い結果となった背景色は青色、茶色、灰色の3パターンとなった。これらの背景色の場合、標的色の明度の値が基本色と背景色の明度の値より大きくなっている。また背景色が茶色の場合、背景色と基本色の彩度の値はほぼ変わらない。これらのことから、基本色と背景色の色によっては明度の差の大きさによらず、識別しやすい

ことがわかる。一方で、背景色が緑色とオレンジ色の場合にはあまり識別できていない。この条件は、フィルタあり条件における背景色の緑色とオレンジ色の色相の値が基本色と標的色の色相の値と同じである。この結果より、背景色と基本色と標的色の色相の値が異なることで、明度の差の大きさによらずに識別性を高められる可能性があり、一般色覚者と色覚多様性者の間に存在する色のハンディキャップの難易度を制御することができる要因の一つになりうるのではないかと考える。

以上の結果より、基本色と標的色と背景色の明度の値に差があれば、彩度の値が同じ場合でも、両者にとって識別する速さは変わらないことが明らかになった。また、背景色と基本色と標的色の色相の値が異なれば、明度の差の大きさによらずに識別性を高められることが明らかになった。この結果から「色覚多様性者が正確、かつ速く色の違いを判断することができる色の組み合わせは、明度の差が大きい色の組み合わせである」という仮説の一部が支持された。また、色覚多様性者にとって一般色覚者より識別可能である多様性識別容易色の要素として明度の差が重要であることがわかった。さらに、注目したい色の明度が周りの色の明度と比べて値が高い場合、一般色覚者と色覚多様性者の両者にとって識別しやすい公平色があることがわかった。

5.3. 背景色を考慮した両者間の2色における識別しやすい色の調査のまとめ

5章では色覚多様性者がゲームをプレイする際に感じる色のハンディキャップをなくすことを目的とし、「色覚多様性者が正確、かつ速く色の違いを判断することができる色の組み合わせは、明度の差が大きい色の組み合わせである」という仮説をもとに、一般色覚者とD型色覚者における識別容易色があるかについて調査を行った。具体的には、5パターンの背景色ごとに選択肢の中で1つだけ異なる色を選択してもらった実験を行い、一般色覚者をD型色覚多様性者の見え方に変換するD型模擬フィルタをかけて行うフィルタあり条件とフィルタなし条件の結果を比較した。実験の結果より、基本色と標的色と背景色の彩度の値に差があれば、明度の値が同じ場合でも、両者にとって識別する速さが変わらないことが示唆された。また、背景色と基本色と標的色の色相の値が異なれば、明度の差の大きさによらずに識別性を高められることが明らかになった。

第6章 リアルタイム色変換システム

本研究では一般色覚者が色覚多様性者と比べて識別しにくい色や、一般色覚者と色覚多様性者にとって識別しやすい色を様々なゲームに適応することで、色のハンディキャップをなくすことが可能になるのではないかと考える(図12)。そのためには、それぞれの色覚タイプに合わせた識別容易色を調べ、その色の組み合わせが一般色覚者にとっても色覚多様性者にとってもゲーム内で識別しやすいのか調査する必要がある。しかし、4章や5章でも述べたように、色覚タイプの割合はその型によってはとても低く[20]、各色覚多様性者を集めて色に関する調査や実験を行うことは困難である。また、色の識別についてもその色同士が隣接しているのか、大きく離れているのか、また大きさはどれくらいなのか、さらに背景色は白なのか黒なのかそれ以外の色なのかなどや、色を見る際の照明の明るさや色、照明が差し込む角度により見え方が異なり、様々な状況や環境で影響が出ると考えられる。

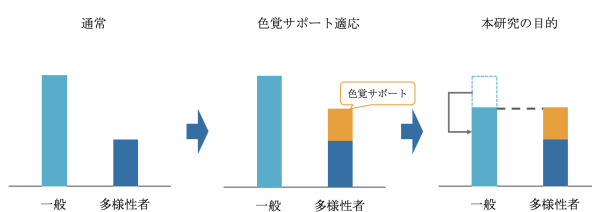


図12 本研究の最終目的

そこで6章では、4章や5章で得られた識別容易色となりうる要素を踏まえて、実際のゲームを用いてリアルタイムに色覚タイプをシミュレート可能なシステムの実装について述べる。

システムは1台のPCで完結するようにするため、メインディスプレイのほかにサブディスプレイを用意し、サブディスプレイ上にゲームを起動する。また、システムはサブディスプレイを常時キャプチャーし、画面上の任意の色のRGB値をそれぞれの色覚多様性者が見ている色のRGB値に変換する。この色覚模擬フィルタを実現するため、浅田[36]が行った色の変換計算を参考に3.3節で使用した計算を用いる(図6)。この変換を行ったRGB値をもとにメインディスプレイで表示する。また、ユーザーのマウスやキーボードなどの操作はサブディスプレイ上に直接送られ、ゲームの操作を可能とする。システムはProcessingを用いて実装した。

フィルタがかかっていない元の状態と、計算した後のD型模擬フィルタがかかった状態の画面を図13に示す。著者が使用しているDellのCPUがCore i7、メモリが16GB、GPUが4GB、解像度が1920*1080の場合、遅延時間は20ms前後であった。

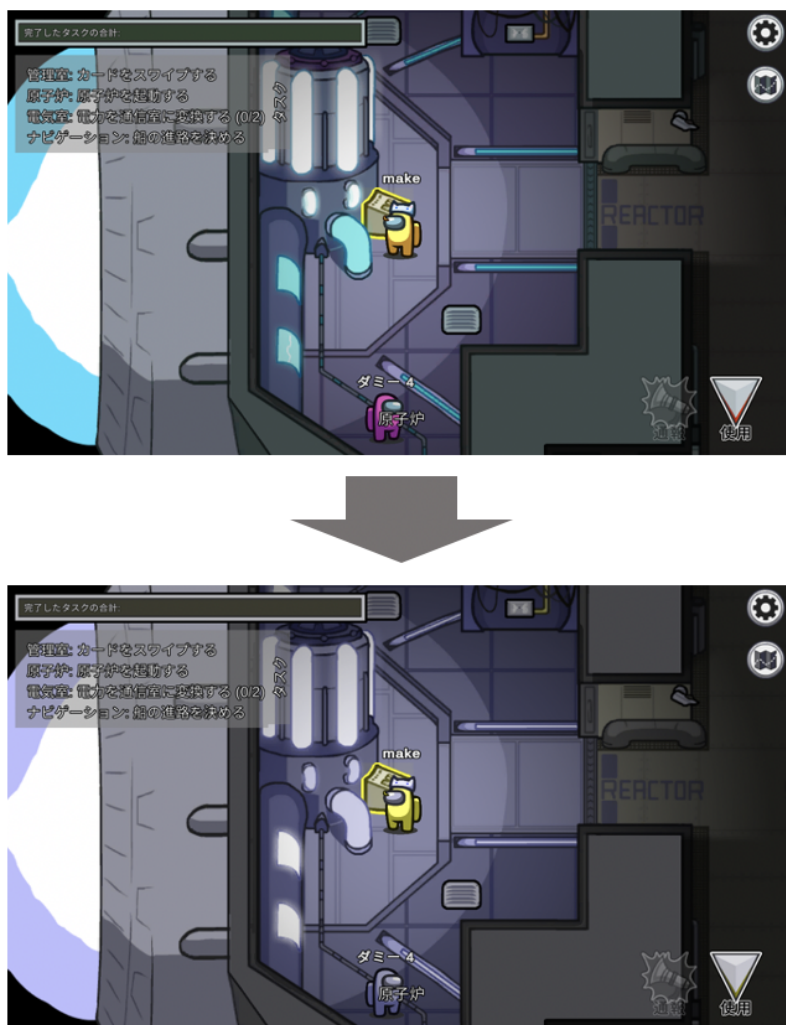


図 13 一般色覚色（上）と D 型色覚色（下） ©2018 Among Us

第7章 Among Us を用いた有利不利制御の検証

7.1. 実験

7.1.1. 実験概要

実験では一般色覚者と色覚多様性者が色において有利不利になるような条件をつくり、ゲームを用いて検証を行う。ここで、様々な色を検証するには複数の色を使用しており、ゲームの進行上色の識別が重要である必要がある。また著者の実装したリアルタイム色変換システムの遅延が 20ms であることから、多少の遅延が許される必要がある。

ここで用いるゲームとして、宇宙人狼ゲームである Among Us[55]を提案する。Among Us は多人数で行うゲームであり、色の識別を行う必要と色に着目したミニゲームをこなしていく必要がある。また、討論の場で色をどう認識したかがわかる必要があるなど、色が重要なゲームである。さらに、多少の遅延は許容できるという特徴がある。そのため、本実験では Among Us を用い、リアルタイム色変換システムを使い、後述する仮説を検証する。

7.1.2. Among Us

Among Us[55]の本質的なルールは人狼と同じで、クルー（村人側）とインポスター（人狼側）に分かれてゲームが進行する。クルー側の勝利条件は「宇宙船内のすべてのタスクを完了すること」か「インポスターの正体を突き止め全員追放すること」かのどちらかである。タスクとは、「宇宙船内に起こっているトラブルの修理」を指す。タスクの内容はどれも直感的な操作でクリアできるミニゲームとなっている。また基本的にはプレイヤーごとに専用のタスクが課されており、自分以外のプレイヤーには自分が課されているタスクは伏せられる。ここで、実験で着目する配線修正タスクは、図 14 のような状態から、画面の左側から右側に両端の配線の色が同じ色になるようにワイヤーを接続するものである（図 15）。このタスクは後述する仮説を検証するために適切なタスクであるため、特に着目する。

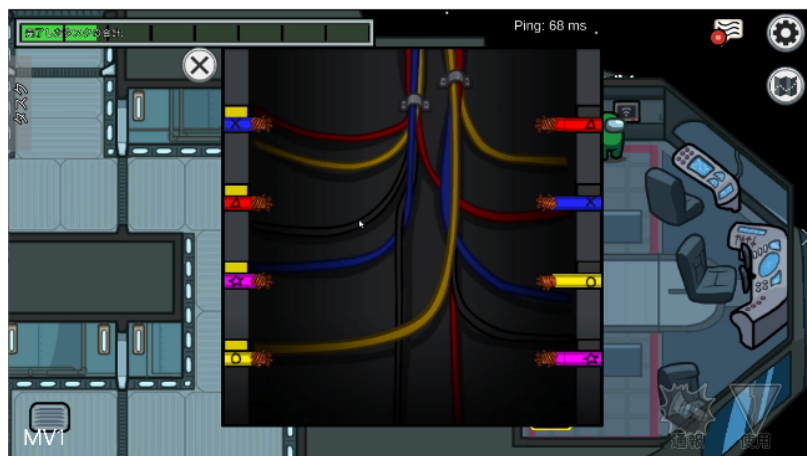


図 14 配線修正タスク（タスク開始前） ©2018 Among Us

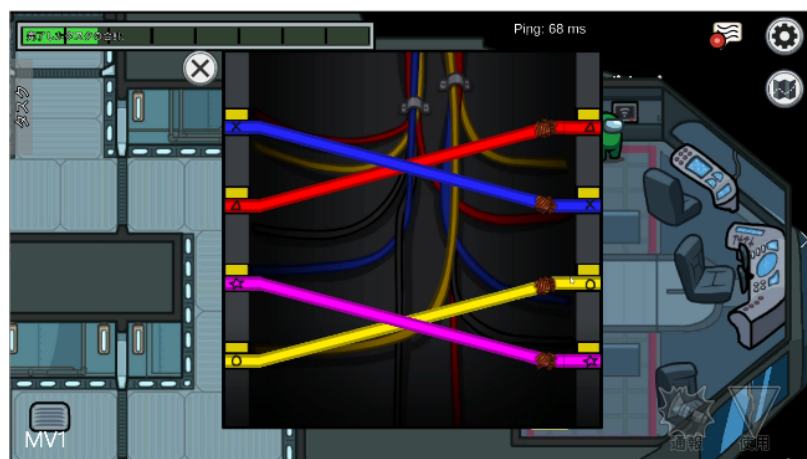


図 15 配線修正タスク（タスク完了） ©2018 Among Us

一方、インポスター側の勝利条件は「クルーをインポスターの同数まで殺害すること」か「クルーの脱出を妨害すること」のどちらかである。クルーを殺害するには、クルーと一定の範囲内に入り、図 16 の右下にあるキルボタンを押すことで可能となる。脱出を妨害する行為として、図 16 の右下にあるサボタージュボタンを押すことで通路を塞いだり、すぐにタスクをこなさないとインポスターが勝ってしまう緊急タスクを起こすことなどがある。

ゲームは「作業フェーズ」と「議論フェーズ」に分かれている。ゲームは常に「作業フェーズ」から開始され、プレイヤーはそれぞれの役割に沿って自分のタスクの実行・殺害の実行などを目的とし、宇宙船内を歩き回る。作業フェーズとはプレイヤーが各々でマップ内を自由に動き回れるターン、議論フェーズとはプレイヤーが集まりテキストチャットやボイスチャットで議論し、多数決で追放者を決めるターンのことである。

プレイヤーの中で殺されたものや、追放されたものは、そのゲームが終了するまで幽霊としてプレイすることができる。ここで幽霊同士は姿を視認できるが、生きているプレイヤーからは見えない。また幽霊となった後も、各々がもつタスクをこなすことやインポスターがクルーの行動を妨害するなどの役割をこなすための行動が可能となっている。



図 16 インポスターの操作画面 ©2018 Among Us

7.1.3. 実験の仮説と色の選定

Among Us はキャラクターの色の識別，また討論が重要になるため，本実験では以下の仮説を立て検証する。

- 仮説 1：全体において，識別しやすい色のキャラクターは識別しにくい色のキャラクターに対して討論の場での会話量が多くなる。
- 仮説 2：全体において，識別しやすい色のキャラクターが識別しにくい色のキャラクターよりも討論の場での色の表現のバリエーションが少なくなる。
- 仮説 3：色に着目したタスクにおいて，識別しにくい色のタスクは識別しやすい色のタスクに対してこなす時間が長くなる。

仮説 1 については識別しやすい色の方が記憶に残るのではないかと考えられ，討論の場でその色に関する言及が増えるのではないかと考えられる。

ここで表 14 は，4 章と 5 章において得られた結果をもとに，著者により Among Us で利用されるキャラクターの色（12 色）の組み合わせについて，識別しやすい色・識別しにくい色と考えられるものを対応付けたものである。ここで F は両者共に識別しやすい，C は一般色覚者が早く識別できる，D は D 型色覚者が早く識別できる，×は両者ともに識別しにくい色を示している。

仮説に対応する識別しやすい色・識別しにくい色は Among Us で使用するプレイヤーの色を選定するにあたり表 14 を参考に、特にセルの背景が黄色の組み合わせに着目して選定を行った。本実験で使用したプレイヤーの色の名称と HSV を表 15 に示す。

表 14 識別する時間の差がないと考えられる色の組み合わせ

	オレンジ	グリーン	シアン	パープル	ピンク	レッド	マルーン	ブルー	ホワイト	ブラック	イエロー	ライム
オレンジ		F	F	F	F	F	F	F	F	F	×	C
グリーン	F		F	F	F	C	C	F	F	F	F	F
シアン	F	F		F	F	F	F	F	C	F	F	F
パープル	F	F	F		D	F	F	×	F	F	F	F
ピンク	F	F	F	D		F	F	F	C	F	F	F
レッド	F	C	F	F	F		C	F	F	F	F	F
マルーン	F	C	F	F	F	C		F	F	C	F	F
ブルー	F	F	F	×	F	F	F		F	F	F	F
ホワイト	F	F	C	F	C	F	F	F		F	F	F
ブラック	F	F	F	F	F	F	C	F	F		F	F
イエロー	×	F	F	F	F	F	F	F	F	F		C
ライム	C	F	F	F	F	F	F	F	F	F	C	

F: どちらも識別できる C: 一般色覚者が早く識別できる
 D: D型色覚者が早く識別できる ×: どちらも識別できない

表 15 実験で用いた色と HSV

	HSV	1戦目	2戦目	3戦目	4戦目
オレンジ	30, 89, 100	●		○	
グリーン	135, 87, 50	○		●	
シアン	177, 73, 100	●	●	○	○
パープル	264, 71, 82	●	○	○	●
ピンク	320, 65, 93	○	○	●	○
レッド	0, 91, 77	○	○	●	●
マルーン	343, 60, 42	○	○	○	●
ブルー	231, 91, 82	●	●	○	○
ホワイト	202, 9, 100	○	●	○	○
ブラック	204, 21, 37	○	○	●	○
イエロー	60, 64, 96		●		○
ライム	112, 76, 94		○		●

7.1.4. 実験手順

本手法では宇宙人狼ゲームである Among Us[55]を用いて擬似的に一般色覚者と D 型色覚者が混じったゲームを行ってもらう。また、6 章で述べたゲームの色をリアルタイムで D 型色覚者の色の見え方に擬似的に変換し、実際に実験で提示した。このシステムで、一般色覚者にフィルタあり条件とフィルタなし条件で実験を行ってもらい、討論の会話やゲーム中のタスクを行った時間の短さで有利不利を判定する。

実験では、一般色覚者である男性 10 人に実験協力を依頼した。実験協力者の 10 人のうち、4 人は D 型模擬フィルタを用いているフィルタあり群、残りの 6 人は一般色覚者であるフィルタなし群として実験を行った。なお、表 15 の黒丸 (●) は D 型模擬フィルタを用いているフィルタあり群、白丸 (○) は一般色覚者であるフィルタなし群を示している。プレイヤーの色はランダムで被らないように割り当てを行った。ゲームマップは The Skeld を使用し (図 17) , ゲーム内のタスクは通常タスクを 2 つ、ロングタスクを 3 つ、ショートタスクを 4 つに設定した。



図 17 The Skeld のマップ ©2018 Among Us

実験における諸注意として、ゲーム画面をフルスクリーン設定にすること、バックグラウンドで動いているものはなるべく停止させること、プレイ中に表示されるプレイヤー名はひらがな 4 文字に設定することを実験協力者に事前に伝えた。プレイヤー名をひらがな 4 文字に固定した理由は、名前の文字数が多いことで壁を突き抜けて見えてしまい、名前による他者の認識を防ぐためである。

フィルタあり群ではゲーム開始前に本システムを実行してもらい、Among Us を通常通りにプレイしてもらった。Among Us のプラットフォームは PC に限定し、キーボードとマウスを使用してもらった。

7.2. 実験結果

実験は全部で4戦分を行った。また実験終了後、録画したプレイ動画を実験協力者から収集し、分析を行った。なお、D型模擬フィルタを利用する実験協力者は毎回ランダムに選定する予定であったが、システムのスペックなどの都合で十分に動作しない実験協力者がいたため、ある程度固定の実験協力者がフィルタあり群として設定された。

表16に配線修正タスクにおける全体、フィルタあり条件、フィルタなし条件における実験協力者10人のタスクをこなした時間の平均と、収集したタスク数とそのミス数を示す。タスクをこなす平均時間については、フィルタあり条件が7.33秒、フィルタなし条件が4.78秒となり、フィルタなし条件の方がタスクをこなす時間が短くなった。

表16 配線修正タスクをこなした平均時間とミス数

	全体	あり群	なし群
平均時間(s)	5.73	7.33	4.78
ミス数/タスク数	2/64	2/24	0/40

インポスターに割り当てられたプレイヤーの色とフィルタあり条件かどうかの結果を表17に示す。1ゲームごとにインポスターは2人割り当てられ、インポスターになったプレイヤーの色がホワイトの場合は4戦中3戦であった。このようなインポスターの偏りはゲームの仕組み上、立てたゲームサーバにおいて連続でゲームを行うと同じ色がインポスターになることが原因と考えられる。ホワイトがインポスターだった3戦は全て別の実験協力者に割り当てられたが、全て議論フェーズで追放されていた。

表17 インポスターの配色とフィルタ条件の有無

	インポスターの色	フィルタあり
1戦目	パープル	○
	マルーン	
2戦目	ブルー	○
	ホワイト	○
3戦目	レッド	○
	ホワイト	
4戦目	イエロー	
	ホワイト	

次に、1戦ごとの（色名を喋った数） / （全会話数）の割合を表18に示す。どの試合においてもフィルタありの方がフィルタなしに比べ色に関する発言数の割合が少ないものとなっていた。また、全体的に会話の5割は色に関する発言が見られた。なお3戦目の割合が低い結果となった理由は、Among Usに慣れており進行役をしていたプレイヤーが死んでしまったため、どう会話を進めればいいのか進行する人がなくなったことが考えられる。

表18 全会話数に対する色名を喋った数の割合

	フィルタあり	フィルタ無し
1戦目	0.519	0.534
2戦目	0.681	0.684
3戦目	0.323	0.433
4戦目	0.617	0.631

7.3. 考察

本研究では、ゲームプレイにおける色のハンディキャップを埋めることを目的とし、7.1.3節で記述した仮説をもとに、色における有利不利が制御可能か実験を行った。

まず仮説3「色に着目したタスクにおいて、識別しにくい色のタスクは識別しやすい色のタスクに対してこなす時間が長くなる」について考察を行う。このタスク時間については、配線修正タスクで用いられている色を検証することで確認できると考えられる。Among Usにおける配線修正タスクで用いられている色は「青」、「赤」、「ピンク」、「黄色」の4色である。これらの色は一般色覚者にとって識別することが可能であるが、D型色覚者にとっては「赤」と「黄色」、「青」と「ピンク」が同じように見えてしまう（図18）。実際フィルタあり条件における配線修正タスク24回分のうち、2回のミスが見られていた（表16）。これらのミスはどちらも赤の配線と黄色の配線を間違えて繋いだものであり、その間違いにも気づけていない様子が見られた。また、フィルタあり群はフィルタなし群と比べ、色を認識する時間が長いことが表16からわかる。討論の場においても「配線修正タスクの色が似すぎて時間がかかる」などの発言があった。そのため色覚多様性者にとって識別しにくい色が用いられていた場合、タスクをこなす時間が長くなっていることが確認できた。

次に、仮説1「全体において、識別しやすい色のキャラクターは識別しにくい色のキャラクターに対して討論の場での会話量が多くなる」、仮説2「全体において、識別しやすい色の

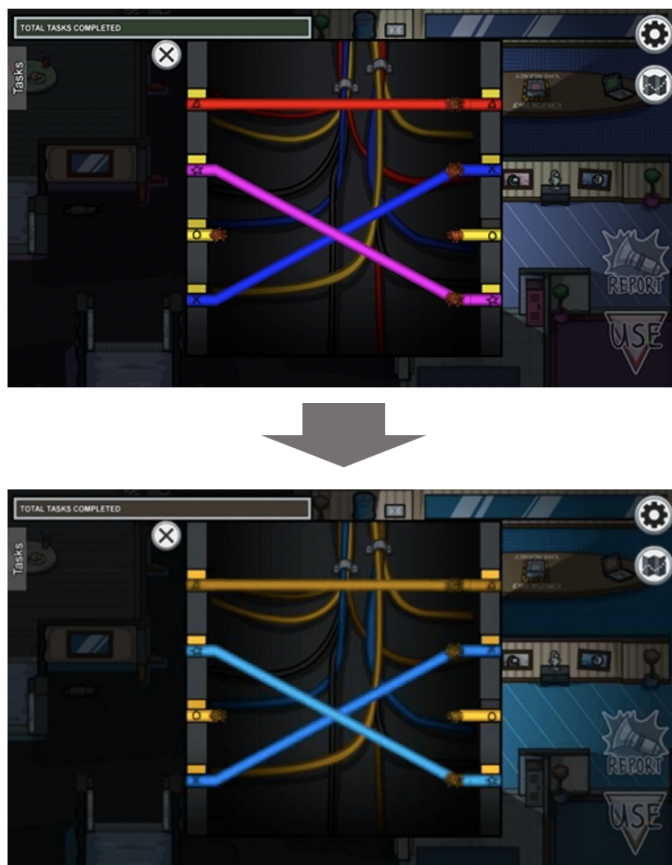


図18 一般色覚色（上）とD型色覚色（下）の配線修正タスク ©2018 Among Us

キャラクターが識別しにくい色のキャラクターよりも討論の場での色の表現のバリエーションが少なくなる」について、該当するシチュエーションごとに整理し、考察を行う。

1つ目のシチュエーションは、オレンジのプレイヤーの死体を発見した際に死体の周辺にいたプレイヤーがオレンジを含めて5人いたという状況に関する討論である。このシチュエーションにおいて、フィルタあり群であるパープルはピンクを視認した発言をしたが、フィルタなし群のマルーンはピンクを認識していなかった。この際、どのプレイヤーがどの色とリンクしているか、フィルタを用いた時の色はどのように見えているのかを事前に確認してもらった。このことから、一般色覚者（フィルタなし群）の方が実際のゲームの中においてもピンクを識別しにくい可能性がある。

2つ目のシチュエーションは、オレンジのフィルタあり条件のプレイヤーが死んだ後の墓場での会話である。オレンジが幽霊視点で「ピンクが白に見える」と発言したが、これは死んだあとの画面が生きている時の画面と比べて視界が晴れていることが影響している（図19・図20）。このように、視界の明度の差が他の色を認識する上で重要な要因であることがわかる。



図 19 生存している時のプレイヤーの視界 ©2018 Among Us



図 20 死んだ後のプレイヤーの視界 ©2018 Among Us

3つ目のシチュエーションは、全員が活着している状況でのフィルタあり群の発言である。1戦目から4戦目まで、実験協力者がそれぞれ識別しやすい色や似ている色について発言していた。フィルタあり群は「ピンクとシアンとホワイト」、「マールンとブラック」、「イエローとライム」、「グリーンとレッドとオレンジ」、「パープルとブルー」を識別しにくい色として挙げていた。また、フィルタなし群は「パープルとブルー」を識別しにくい色として挙げていた。これらの発言から7.1.3節で述べた仮説のうち、「パープルとブルー」はどちらの条件においても識別しにくい色であり、さらに色のハンディキャップを広げてしまう色の組み合わせであると考えられる。一方で同様に識別しにくい色の組み合わせであるため、公平色であるとも考えられる。また「イエローとライム」の組み合わせは、D型色覚者にとって最も識別しにくい色として、さらに色のハンディキャップを広げてしまう色の組み合わせであると考えられる。しかし、4戦目ではどちらの条件においても「レッド」は他の色と比べて似ている色はないと発言していた。これより、赤という色は一般色

覚者にとっても色覚多様性者にとっても識別できる色として、本研究の目的を達成できる要因であると考えられる。ただし、グリーンが参加している1戦目と3戦目ではD型色覚者から「レッドとグリーンはほぼ同じ」という意見が多くあり、用いる色によっては識別しにくい色になってしまう。

4つ目のシチュエーションは、インポスターのブルー（フィルタあり群）がインポスターのホワイト（フィルタあり群）を庇う嘘をついた討論である。マップの左側でホワイトがキルをした状況で、左側にはホワイト1人しかいないと議論になった時、ブルーが「右側にホワイトいた気がするんだよな」と庇うように発言していた。しかし、シアン（フィルタあり群）とレッド（フィルタなし群）はその発言に対し、「ホワイトは絶対いなかった」と強く反論していた。つまり、ホワイトはどちらの条件においても識別しやすい色であり、自信をもって識別できる公平色であることがわかる。この討論が行われたゲーム終了後に改めてシアンとレッドに振り返ってもらったところ、「何色かは確証がなかったが、ホワイトだけは見てないって絶対の自信をもって言えた」と回答している。そのため、白は一般色覚者においても色覚多様性者においても識別しやすいと考えられる。しかし、ブラックについては「マルーン」と識別しにくいとの意見が多く、こちらは表14で定義した識別しやすい色とは反する結果となっていた。

以上のことより、配色次第では一般色覚者も色覚多様性者もゲームの有利不利制御が可能であることがわかった。

7.4. Among Us を用いた有利不利制御の検証実験のまとめ

本研究では色覚多様性者がゲームをプレイする際に感じる色のハンディキャップをなくすことを目的とし、「色に着目したタスクにおいて、識別しにくい色のタスクは識別しやすい色のタスクに対してこなす時間が長くなる」、「全体において、識別しやすい色のキャラクターは識別しにくい色のキャラクターに対して討論の場での会話量が多くなる」、「全体において、識別しやすい色のキャラクターが識別しにくい色のキャラクターよりも討論の場での色の表現のバリエーションが少なくなる」という仮説をもとに Among Us を用いた実験を実施し、色のハンディキャップにおける制御が可能かに関する検討を行った。

実験の結果より、「色に着目したタスクにおいて、識別しにくい色のタスクは識別しやすい色のタスクに対してこなす時間が長くなる」という様子が確認でき、配色次第では一般色覚者も色覚多様性者もゲームの有利不利が変わることがわかった。一方で「全体において、識別しやすい色のキャラクターが識別しにくい色のキャラクターよりも討論の場での色の表現のバリエーションが多くなる」、「全体において、識別しやすい色のキャラクターは識別しにくい色のキャラクターに対して討論の場での会話量が多くなる」という仮説は部分的にその様子が確認できた。今回実験で使用した Among Us では、1人で与えられたタスクをこなしている間に色やプレイヤー名の認識をし、討論の際に自分の行動を話すための記憶

が重要になる。そのため、その時はどの色が通ったなどと覚えているが、どれくらい記憶できるかは個人差が生じる。よって今回の実験では色を識別すること以外の要因が影響を及ぼした可能性も考えられる。

第8章 現状の色覚サポートが抱える問題の調査

8.1. 実験

8.1.1. 実験概要

ゲームをプレイする上で様々な要素から情報を取得し、素早い状況判断をすることで勝率は上がっていく。様々な要素として、音や色、敵が起こした行動から読み取れる。しかし、色に関しては色覚多様性者が圧倒的に不利である。そのため、多くのゲームが色覚サポートを実装し、勝敗が色の識別性に偏らないような配慮がされている。しかし、配色における明確なガイドラインは存在しておらず、1.3節でも述べたようにゲームによって色覚サポートの内容が異なる。そのため、ゲーム自体は面白いコンテンツであるにも関わらず、ユーザビリティに関する満足度が低いゲームは多い。しかし先ほども述べたようにガイドラインは存在しておらず、明確に何が問題なのかが不明である。

そこで8章では色覚多様性者が現状のメジャーな esports ゲームにおいて、色の識別困難性がゲームプレイに及ぼす問題を明らかにすることを目的とした調査を行う。具体的には、esports において8つのゲームジャンル[56]に分類されている中で、PCでプレイが可能なゲームに限定する。

ここで用いるゲームとして、ぷよぷよ[8]と VALORANT[57]を提案する。ぷよぷよは esports のジャンルの中ではパズルゲームに、VALORANT は FPS ゲームに分類している。またこれらのゲームは、ゲーム内で使用している色が限定されることや色覚サポートを実装しているゲームであるため、本実験で採用した。

また6章で述べたシステムを使用した場合、遅延時間は20ms前後となるがどちらのゲームにおいても著しくパフォーマンスが落ちる遅延でないと判断した。

8.2. パズルゲームにおける現状の色覚サポートの問題の調査

8.2.1. ぷよぷよ

ぷよぷよ[8]は、テトリスのような落ちものパズルゲームのルールが基本となっている。(図 21) 自分のエリアに落ちてくる「ぷよ」というオブジェクトを同じ色同士で並べることでその「ぷよ」が消滅する。降ってくる「ぷよ」は「紫」、「赤」、「黄色」、「緑」、「青」のうち4色が2個1組で落ちてくる。それを左右移動や左右回転をさせて、同色を4つ以上繋げると消滅し、得点が加算される。また、一定の得点に達することで「おじゃまぷよ」を相手のエリアに送り、邪魔をすることができる。この「おじゃまぷよ」を上手く使い、相手のエリアの一番上の段が埋まることで勝利になる。「おじゃまぷよ」同士を4

つ以上繋げても消滅はせず、「おじゃまぷよ」の近くで通常の色「ぷよ」を同色4つ以上つなげて消滅させると一緒に消すことができる。この実験では大会で使用されている上記のルールを採用する。



図 21 ぷよぷよのゲーム画面 ©2018 ぷよぷよ

8.2.2. 実験手順

本実験では落ちものパズルゲームで esports ゲームであるぷよぷよ[8]を用いて擬似的にそれぞれの色覚多様性者が見ていると思われる色を見ながらゲームを行ってもらおう。また、3章で述べた式を用いて、6章で述べたゲームの色をリアルタイムでそれぞれの色覚多様性者の色の見え方に擬似的に変換し、実際に実験で提示した。このシステムで、一般色覚者にフィルタあり条件とフィルタなし条件で実験を行ってもらい、ゲーム終了後に色の識別が難しかった場面に関してインタビューやプレイヤ同士の討論の会話から問題を調査する。その際、プレイ中の様子を録画した動画を見ながら討論することを許可した。

実験では、一般色覚者である4人に実験協力を依頼し、2人1組で実験を行った。なお、表19はプレイで用いるフィルタの種類と色覚サポートを使用するかについて示している。フィルタの種類はその色覚タイプに見えると思われる色に変換するフィルタを、色覚サポートの有無は色覚サポートを使用してゲームをしたかについて示しており、全部で7通りを調査する。「フィルタなし」の項目については、フィルタを一切使わない普段の状態で行っている。また、それぞれの条件ごとで色による影響を考慮し、次の条件に移る前にインターバルとして一般色覚者同士の通常プレイを行い、対策をした。

実験における諸注意として、ゲーム画面をフルスクリーン設定にすること、バックグラウンドで動いているものはなるべく停止させること、プレイ中に他の音楽などの雑音を排除すること、ゲームをプレイして色が識別しにくくて困った場面を意識しながらプレイす

ること、実際に困った場合にはなるべくどのようにして困ったかを具体的に発言するようにすることを実験協力者に事前に伝えた。ゲームにおいて困難な場面に当たることは多いが、本実験においては色にのみ着目するため、他の要因は考慮しない。

実験協力者はゲーム開始前に本システムを実行してもらい、ぷよぷよを通常通りにプレイしてもらった。ぷよぷよのプラットフォームはPCに限定し、キーボードを使用してもらった。

表 19 プレイ中で用いるフィルタの種類と色覚サポートの有無

実験協力者①		実験協力者②	
フィルタの種類	色覚サポートの有無	フィルタの種類	色覚サポートの有無
P型フィルタ	×	P型フィルタ	×
P型フィルタ	○	P型フィルタ	○
D型フィルタ	×	D型フィルタ	×
D型フィルタ	○	D型フィルタ	○
T型フィルタ	×	T型フィルタ	×
T型フィルタ	○	T型フィルタ	○
フィルタなし	×	フィルタなし	×

8.2.3. 実験結果

実験は1組あたり14戦、全部で28戦分のゲームを行った。またゲーム終了後、実験協力者同士で討論や個別でインタビューを行った。表20はそれぞれのフィルタの種類と色覚サポートの有無ごとにおける良い点と悪い点をまとめたものを示している。斜線を引いている項目は意見が特になかった。全体的に色覚サポートあり条件と一般条件は色覚サポー

表 20 各条件における良い点と悪い点

フィルタと色覚サポートの種類	良い点	悪い点
P型フィルタ 色覚サポートなし		<ul style="list-style-type: none"> ・黄色、緑、赤が同じで3色が一緒だった ・この条件が一番ぷよぷよできない ・紫と青があまりにも混同しすぎてゲーム性崩壊してる ・おじやまぷよも混同してわかんない ・3色にしか見えない(青と紫があまりにも同じすぎ) ・10個繋がっても消えないのなんで?レベルで気づいてない
P型フィルタ 色覚サポートあり	<ul style="list-style-type: none"> ・P型・サポートなしと比べるときつと思うことはない ・おじやまぷよが黄色とか緑と識別しやすくなった ・黄色と緑の区別は格段に上がった 	<ul style="list-style-type: none"> ・T型・サポートなしより見にくくなった ・濃淡でしか判別できないのが大変 ・紫と青の識別はまだ難しい ・青系が2種類あるのが違和感ある ・スピードはあげられない ・でももう少し色の違いを出して欲しい(今のままだと2色2色に見える)
D型フィルタ 色覚サポートなし		<ul style="list-style-type: none"> ・赤、黄色、緑の3色があった場合、どれも黄土色に見えて困る ・青と紫、黄色と緑の組み合わせは青と黄色にしか見えない ・最初は青が同じだと思ってたけど黄色の方が識別できなかった ・判断するのにめちゃくちゃ時間かった
D型フィルタ 色覚サポートあり	<ul style="list-style-type: none"> ・一般の次点で見やすかった ・色覚多様性者の色覚サポートありの条件だとこの条件が一番見やすかった ・これだったらスピードはあげれる ・4色が識別できる 	
T型フィルタ 色覚サポートなし	<ul style="list-style-type: none"> ・一般の次点で見やすかった ・4色の識別はできる ・赤と青が分かりやすい ・緑と青の識別ができる ・ゲーム性は損なわれていない 	<ul style="list-style-type: none"> ・識別しにくい意見もあるが少数派だった ・プロ並みにスピードを上げるのは難しい
T型フィルタ 色覚サポートあり	<ul style="list-style-type: none"> ・D型・サポートなしよりかは早くできる 	<ul style="list-style-type: none"> ・T型・サポートなしの方が見やすかった ・緑と黄緑、ピンクと紫の区別はT・なしより難しくなった ・主観だけど色合いが好きではない ・水色と青が若干見にくい
一般 色覚サポートなし	<ul style="list-style-type: none"> ・一番慣れている ・普通の方がやりやすい ・今までの中で一番見やすい 	

トなし条件より良い点が多い結果となった。また、T型フィルタ・色覚サポートなし条件においては良い点の方が多結果となった。

8.2.4. 考察

本実験では、色の識別困難性がゲームプレイに及ぼす問題を明らかにすることを目的とし、ぷよぷよ[8]を用いて調査を行った。

図22はそれぞれの色覚多様性者が見ていると思われる色の画面、図23はそれぞれの色覚多様性に対応した一般色覚者が見ている色覚サポートの画面、図24は色覚模擬フィルタを用いてそれぞれの色覚多様性者が見ていると思われる色覚サポートの画面を示している。

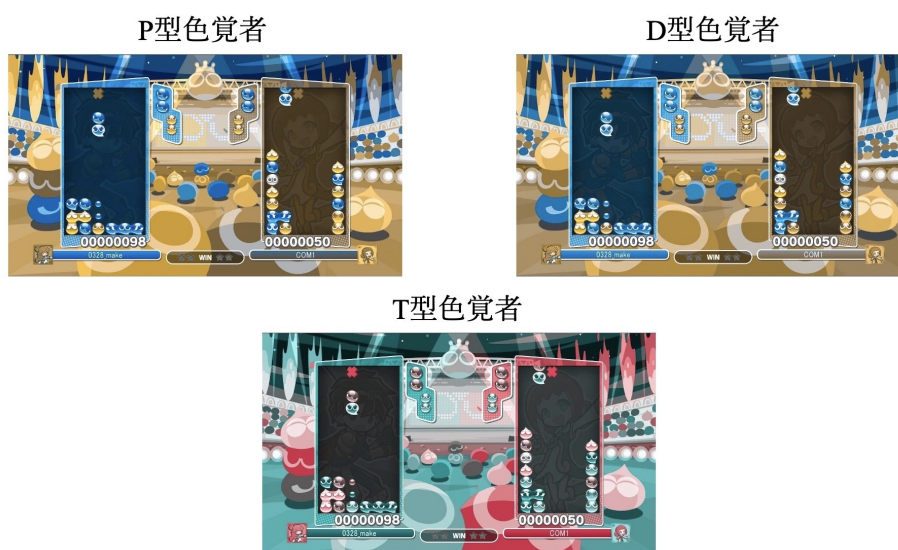


図22 各色覚多様性者が見ていると思われるゲーム画面 ©2018 ぷよぷよ

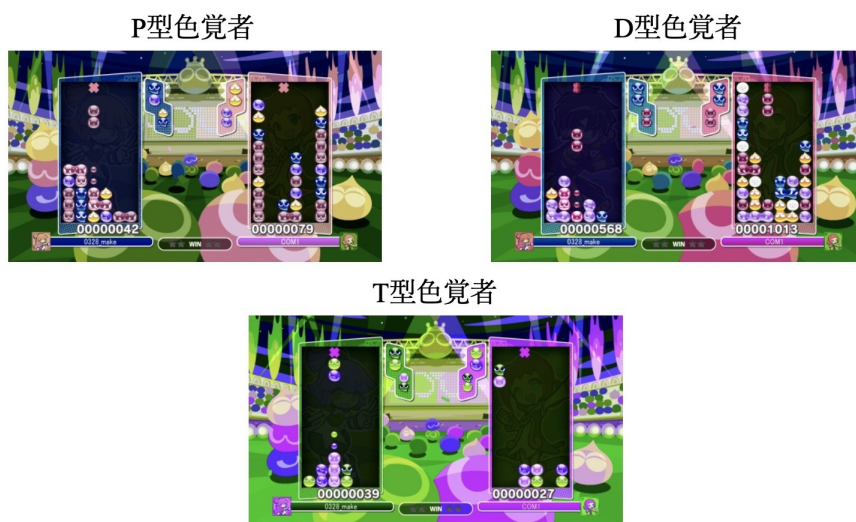


図23 それぞれの色覚サポートの画面 ©2018 ぷよぷよ

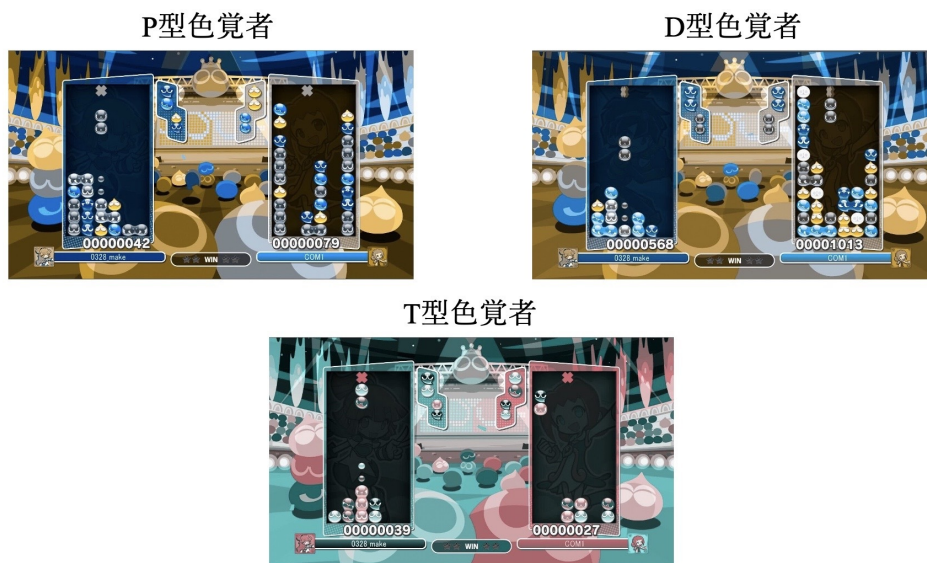


図 24 各色覚サポートを各色覚多様性者が見ていると思われるゲーム画面

©2018 ぶよぶよ

まず一番識別性が高かった条件について考察を行う。実験協力者全員に当てはまる条件として、「一般・色覚サポートなし」が挙げられた。この要因として、実験協力者が一般色覚者であることが影響していると考えられ、普段から慣れている色の識別性が高いことは明確である。次点として、「D型フィルタ・色覚サポートあり」と「T型フィルタ・色覚サポートなし」が識別性が高い条件としてあげられていた。「D型フィルタ・色覚サポートあり」は色覚サポートがある条件の中で一番識別性が高いという意見が多かった。このことから、ゲームにおける色覚サポートの実装はD型色覚者が基準として行われている可能性が示唆された。この理由として、色覚多様性者の中で一番割合が高いタイプがD型色覚者であること[14]が考えられる。一方で、「T型フィルタ・色覚サポートなし」は色覚サポートがない条件の中で一番識別性が高いという意見が多かった。このことから、T型色覚者は現状のゲーム環境において問題なくプレイすることができていることがわかる。T型色覚者の割合は低い[14]ため、サポートに関してあまり焦点が当たっていなかった。しかし、今回の実験を通してT型色覚者にとってぶよぶよは問題なくプレイすることができるゲームという新たな知見が得られた。

8.3. FPSゲームにおける現状の色覚サポートの問題の調査

8.3.1. VALORANT

VALORANT[57]は、カウンターストライクという対テロ特殊部隊とテロリストとの戦いをテーマにしたファーストパーソン・シューティングゲーム（FPS）が基本的なルールで

ある。図 25 は実際のゲーム画面の例を示す。5 対 5 で攻撃チームと防衛チームに分かれてゲームが進行し、攻撃チームはマップ内に複数ある攻略目標のどこかを爆破すれば勝利、防衛チームは爆破を阻止すれば勝利となり、1 ラウンドを取得できる。爆破が起こらない場合でも、先に相手チーム 5 人を銃で倒してもラウンド取得となる。先に 13 ラウンドを先取したチームがその試合の最終勝利となる。大会の場合ではラウンド取得が 12 対 12 と並んだ場合、先に 2 ラウンドを連続で先取したチームが勝利となる。

VALORANT には様々なキャラクターが存在しており、それぞれのキャラクターにしか使えないアビリティやスキルが存在する。そのスキルをどう使うかなど幅広い戦略を立てることが魅力の一つとして人気が高まっている。



図 25 VALORANT のゲーム画面 ©2022 VALORANT

8.3.2. 実験手順

本実験では FPS ゲームで esports ゲームである VALORANT[57]を用いて擬似的にそれぞれの色覚多様性者が見ていると思われる色を見ながらゲームを行ってもらう。また、3 章で述べた式を用いて、6 章で述べたゲームの色をリアルタイムでそれぞれの色覚多様性者の色の見え方に擬似的に変換し、実際に実験で提示した。実験で使用したゲームモードは射撃のみの戦いで行うデスマッチを用いる。このゲームモードを採用した理由として、チーム戦で行った場合、あまりにも下手なプレイをするとゲームのアカウント自体がバンされて使えなくなってしまうことを考慮したためである。このシステムで、一般色覚者にフィルタあり条件とフィルタなし条件で実験を行ってもらい、ゲーム終了後に色の識別が難しかった場面に関してインタビューやプレイヤ同士の討論の会話から問題を調査する。その際、プレイ中の様子を録画した動画を見ながら討論することを許可した。

実験では、一般色覚者である 1 人に実験協力を依頼し、実験を行った。それぞれの色覚模擬フィルタ 3 種類に対して色覚サポートありなし条件の 2 パターンと一般色覚者の色覚サポートがない条件の 7 通りを調査する。また、それぞれの条件ごとで色による影響を考慮し、次の条件に移る前にインターバルとして一般色覚者が見ている通常プレイを行い、対策をした。マップに関しては 7 マップがランダムでマッチするシステムのため、本実験では固定しないこととする。

実験における諸注意として、ゲーム画面をフルスクリーン設定にすること、バックグラウンドで動いているものはなるべく停止させること、プレイ中に他の音楽などの雑音を排除すること、ゲームをプレイして色が識別しにくくて困った場面を意識しながらプレイすること、実際に困った場合にはなるべくどのようにして困ったかを発言するようにすることを実験協力者に事前に伝えた。ゲームにおいて困難な場面に当たることは多いが、本実験においては色にのみ着目するため、他の要因は考慮しない。

実験協力者はゲーム開始前に本システムを実行してもらい、VALORANT を通常通りにプレイしてもらった。VALORANT のプラットフォームは PC で、キーボードとマウスを使用してもらった。

8.3.3. 実験結果

実験は各条件を 1 戦、全部で 7 戦分のゲームを行った。またゲーム終了後、実験協力者にはそのゲームにおける色の識別困難性についてインタビューを行った。表 21 はそれぞれのフィルタの種類と色覚サポートの有無ごとにおける良い点と悪い点をまとめたものを示している。斜線を引いている項目は意見が特になかった。全体的に色覚サポートがある条件と一般条件は良い点が多い結果となった。また T 型フィルタ・色覚サポートなし条件においては良い点の方が多結果となり、8.2.3 節と似ている結果となった。さらに、P 型模擬フィルタと D 型模擬フィルタを用いた 4 条件において、マップに敵が映る印が見えづらかったという意見が出た。

表 21 各条件における良い点と悪い点

フィルタと色覚サポートの種類	マップ	良い点	悪い点
P型フィルタ 色覚サポートなし	パール	・青系のキャラクターが見やすい	・敵の位置が見えない ・敵のハイライトがない
P型フィルタ 色覚サポートあり	アセント	・青系統が見やすかった	・マップの赤点が見えづらい ・背景が黄色だから色覚サポートと被ってて恩恵がない ・色覚サポートの恩恵が何もない ・全体的に見づらかった
D型フィルタ 色覚サポートなし	スプリット	・青系はよく見える ・Aサイト内見やすい ・ネオンは圧倒的見やすい	・マップの赤点が見えない ・敵のハイライトは見えない ・黒いキャラクターは遠くからだと見えにくい ・銃を覗き込んだ時のレティクルは見えにくい
D型フィルタ 色覚サポートあり	スプリット	・ハイライトのおかげでキャラクターが少しだけ黄色くなる ・青系が見やすい	・遠目で見ると黄色く光らずに見にくい ・黄色いキャラクターはハイライトの恩恵がない
T型フィルタ 色覚サポートなし	ヘイブン	・赤いハイライト（色覚サポートなし）の方が強調されてみやすい ・キルジョイのような黄色いキャラクターが見やすい ・この条件が一番見やすい	
T型フィルタ 色覚サポートあり	アイスボックス	・オレンジ群のキャラが見やすくなった ・キャラクターの色によってハイライトが気持ち光ってる ・リスブーンした時の赤点が見やすい ・白が多いマップだと見えにくさは変わらない	・ネオンみたいな青キャラは見えにくくなった ・ハイライトが全然ない
一般 色覚サポートなし	アセント	・慣れたものもあるけど一番見やすい ・赤が一番ハイライトされてる感ある ・いろんな色が見えた方が情報取れるんだと再確認	

8.3.4. 考察

本実験では、色の識別困難性がゲームプレイに及ぼす問題を明らかにすることを目的とし、VALORANTを用いて調査を行った。

図 26 はそれぞれの色覚多様性が見ていると思われる色の画面，図 27 はそれぞれの色覚多様性に対応した一般色覚者が見ている色覚サポートの画面，図 28 は色覚模擬フィルタを用いてそれぞれの色覚多様性者が見ていると思われる色覚サポートの画面を示している。

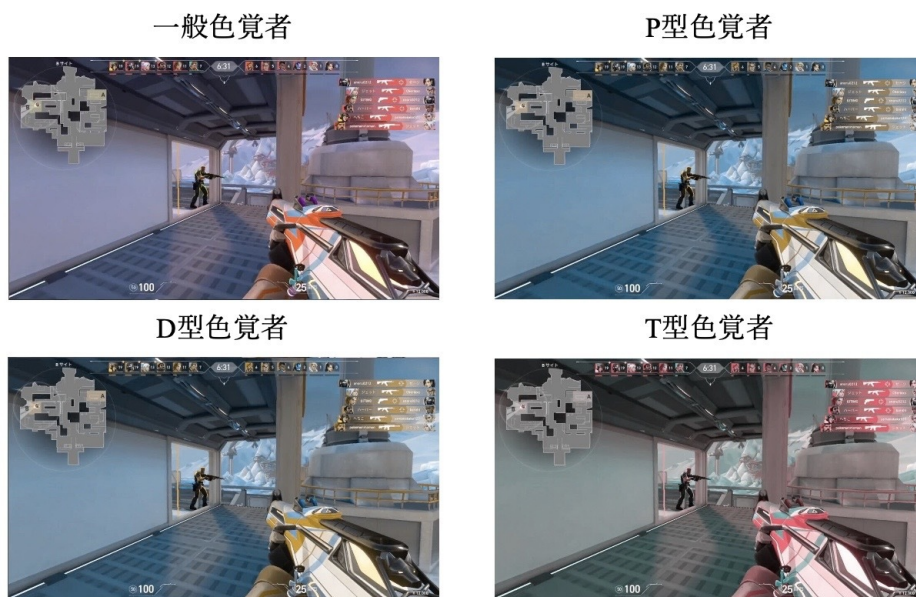


図 26 各色覚多様性者が見ていると思われるゲーム画面 ©2022 VALORANT

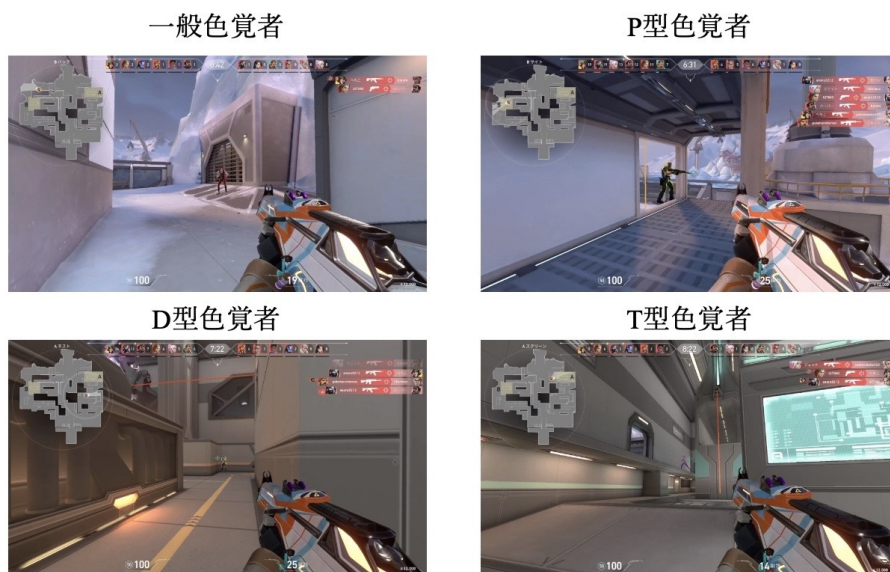


図 27 それぞれの色覚サポートの画面 ©2022 VALORANT

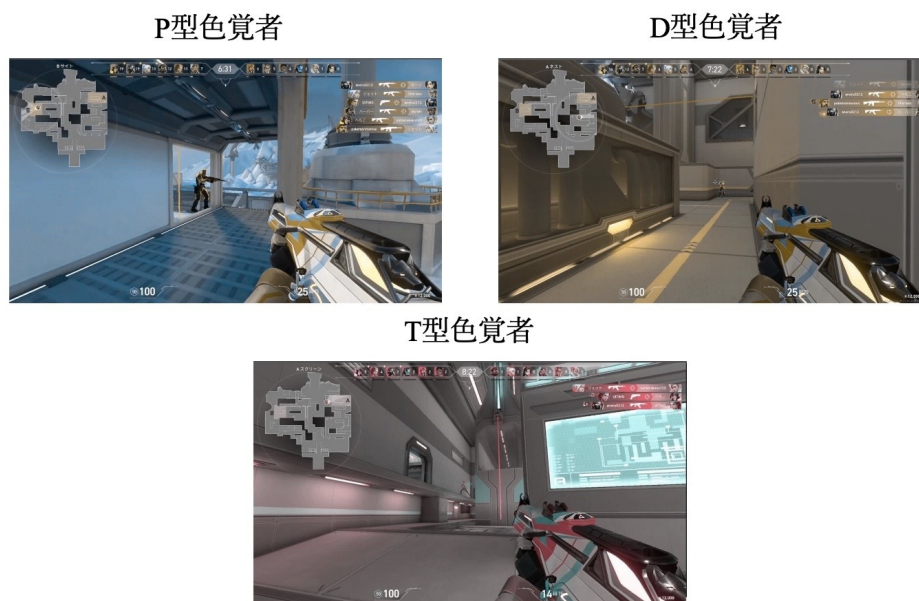


図 28 各色覚サポートを各色覚多様性者が見ていると思われるゲーム画面

©2022 VALORANT

まず一番識別性が高かった条件について考察を行う。実験を行った 7 通りの中で一番識別性が高い条件は「一般・色覚サポートなし」が挙げられた。この要因として、8.2.4 節でも述べたように実験協力者が一般色覚者であることが影響していると考えられ、普段から慣れている色の識別性が高いことは明確である。一方で、「T 型フィルタ・色覚サポートなし」は色覚サポートがない条件の中で一番識別性が高いという意見が多かった。この結果は 8.2 節の実験と同じ結果になった。この結果の要因として、VALORANT で使用している色が黄色や緑、赤が多く、P 型色覚者や D 型色覚者にとっては似ている色に見えてしまうことがわかった。また、T 型色覚者にとっては赤と緑の識別は問題なく行えることがわかり、P 型色覚者や D 型色覚者と比べて色のハンディキャップが少ないことが考えられる。

次に、表 21 にも記載されている「マップの赤点が見えづらい」という意見について考察を行う。これはゲーム中に自身が敵に倒された後にリスポーンする際に、左上のミニマップに大雑把に敵がどこにいるか表示する仕様になっている（図 29）。その際のマークは赤を採用しているが、P 型模擬フィルタと D 型模擬フィルタの 4 条件においてはこのマークが見えづらいという意見が出た。この問題が生じた要因として、VALORANT の色覚サポートが敵の輪郭に対してハイライトをつけるのみであり、マップやキャラクターの色に対しては色覚サポートが適応されていないことが考えられる。これは esports で採用されている大会のゲームモードにも同様のことが言える。このような FPS ゲームは目の前の敵だけに注目するのではなく、マップ全体を把握しながら状況判断をすることが重要であり、マップの識別困難性があることで不利になってしまう。本実験では敵をハイライトして見やす

くする色覚サポートでは遠くにいる敵には見えづらいという問題や、マップの重要性に対して色覚サポートが不十分であることがわかった。

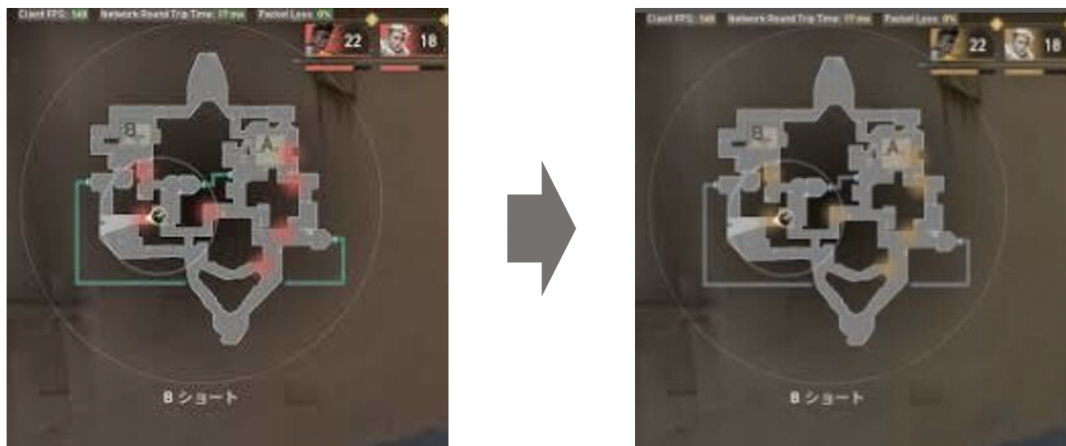


図 29 一般色覚色（左）と D 型色覚色（右）のミニマップ ©2022 VALORANT

8.4. 現状の色覚サポートが抱える問題の調査のまとめ

本研究では色覚多様性者が現状のメジャーな esports ゲームにおいて、色の識別困難性がゲームプレイに及ぼす問題を明らかにすることを目的とし、パズルゲームの代表ゲームである「ぷよぷよ」と FPS ゲームの代表ゲームである「VALORANT」を用いた調査を行った。

実験の結果より、一般色覚者が見ている色において問題は見つからなかったこと、「T型フィルタ・色覚サポートなし」が次点で識別性が高いこと、ゲームジャンルによっては色覚サポートが十分でないことが明らかになった。今回実験で使用したぷよぷよは色覚サポートを用いることで画面全体の色や形が変更され、色覚多様性のプレイヤーにとってもプレイしやすい環境が構築されていた。一方で、瞬時の判断が必要になる VALORANT ではマップ全体の把握も重要になるがそこに対するサポートがない。このようなゲームジャンルは全体の色を変更すると UI の使いにくさが問題となるゲームが多いため、良いバランスを取ることは難しい。そのため、Overwatch[49]のようなプレイヤーと制作側がコミュニケーションを取れる場を設け、プレイヤーのフィードバックをもらいながらつくり上げる環境を整えることが望ましい。

第9章 総合考察と今後の展望

本章では、本論文全体の考察と今後の展望について述べる。

まず、本研究の目的である「オンラインゲームにおいて一般色覚者と色覚多様性者間にある色のハンディキャップをなくす」ことを達成するために行われた指標の調査について考察する。4章の実験より、多様性識別容易色として明度の差だけでなく、彩度の値に差がありかつ色相の値が同じである色の組み合わせが適していることが示唆された。しかし、この実験では背景色を白に固定しているため、基礎的な知見に留まってしまい、ゲームのようなカラフルな背景色に同様の要因が当てはまるかは明らかにできなかった。そのため、背景色を追加した実験を行った。5章の実験より、基本色と標的色と背景色の彩度の値に差があれば、明度の値が同じ場合でも、両者にとって識別する速さが変わらないこと、背景色と基本色と標的色の色相の値が異なれば、明度の差の大きさによらずに識別性を高められることが示唆された。

次に、4章と5章の実験で得られた知見を用いて、実際のゲームにおける有利不利制御が可能かについて考察する。7章の実験より、色覚多様性者が有利になれること、色覚多様性者や一般色覚者の両者にとっても不利になってしまう場合があること、7.3節でも述べたように色覚多様性者が識別しにくかったなどの色の制約を逆手にとった戦略が見られたことがわかった。この結果から、色覚多様性者が色によるハンディキャップを全面的に背負っていないことが明らかになった。実際にフィルタあり条件の実験協力者は、「自分の目で初めて見ることで言葉だけでは理解できなかった世界を理解できた」と同時に、「色覚多様性者が見ている色は新しい戦略として使うことができた」といったポジティブな意見が得られた。一方で、「色覚多様性者にとって、一般色覚者の見ている色は今後も理解できないため、お互いを理解し合えるのは難しそう」といったネガティブな意見も得られた。

最後に、現状のメジャーな esports ゲームにおいて、色の識別困難性がゲームプレイに及ぼす問題について考察する。8章の調査より、esports のゲームジャンルによって色覚サポートが十分に機能していないこと、ゲームのUIの使いやすさとのバランス調整が難しいこと、T型色覚者が見ていると思われる色は色覚サポートがない方が識別性が高いことがわかった。この結果は、現状の色覚サポートでは対策しきれていない抽象的な意見を具体的にすることができ、どの部分に再注目する必要があるのか明らかになった。しかし、今回は8つのゲームジャンルの中でパズルゲームとFPSゲームの2つしか調査を行っていないため、今後は残りの6つのゲームジャンルの調査を行う予定である。

第10章 おわりに

本研究では、オンラインゲームにおいて一般色覚者と色覚多様性者間にある色のハンディキャップをなくすことを目的とし、色覚多様性者が見ていると思われる色へ変換するシステムを提案した。まず、色覚多様性者と一般色覚者間で識別しやすい色の指標の調査を行い、一般色覚者を実験対象者とした実験を行い、指標となる要因を明らかにした。次に、実験で得られた指標をもとに実際のゲームを用いた色のハンディキャップにおける制御が可能か調査を行った。この実験においても一般色覚者を実験協力者の対象者とし、リアルタイムで色覚多様性者が見ていると思われる色に変換するシステムを提案した。結果から、色覚多様性者でも一般色覚者でも色のハンディキャップが存在することがわかった。最後に現状のメジャーな esports ゲームにおいて、色の識別困難性がゲームプレイに及ぼす問題について調査を行った。この調査においても上記と同様に一般色覚者を実験協力者の対象者とし、リアルタイムで色覚多様性者が見ていると思われる色に変換するシステムを用いた。結果から、色覚多様性者の中で T 型色覚者は色によるハンディキャップが少ないこと、現状の色覚サポートでは色のハンディキャップをなくすことがまだまだ難しいことがわかった。

今後は本システムがより身近に使えるように、PC のスペックに依存しないシステムの開発、パズルゲームと FPS ゲーム以外の esports ジャンルに着目した現状の色覚サポートの問題の調査を行っていく予定である。

インターネットの普及により、多くの人々が PC を操作することが日常となっている。しかし新しいものには隠れた問題が存在しており、色覚もその問題の一つである。1 章でも述べたように人によって見る色が異なり、その違いを主観で理解することは難しい。著者自身ももどかしい経験をしてきた分、本研究を通して少しでも色覚に関する問題を感じて欲しい、世界中の人が理解をするきっかけになれることを強く望む。

謝辞

Web 公開版からは謝辞を削除しました.

参考文献

- [1] Yee, N., Ducheneaut, N., and Nelson, L.. Online Gaming Motivations Scale: Development and Validation, CHI, 2012, pp. 2803-2806.
- [2] Funk, D. C., Pizzo, A. D., and Baker, B. J.. eSport Management: Embracing eSport Education and Research Opportunities, Sport Management Review, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 7-13.
- [3] 藤桂, 吉田富二雄. オンラインゲーム上の対人関係が現実生活の社会性および攻撃性に及ぼす影響, 心理学研究, 2010, vol. 80, no. 6, pp. 494-503.
- [4] Zhu, L.. The Psychology Behind Video Games During COVID-19 Pandemic: A Case Study of Animal Crossing: New Horizons, Human Behavior and Emerging Technologies, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 157-159.
- [5] Nathans, J., Piantanida, T. P., Eddy, R. L., Shows, T. B., and Hogness, D. S.. Molecular Genetics of Inherited Variation in Human Color Vision, Science, 1986, vol. 232, pp. 203-210.
- [6] 中村聡史. 失敗から学ぶユーザインタフェース 世界はBADUI(バッド・ユーアイ)であふれている, 技術評論社, 2015.
- [7] Post, R. H.. Population Differences in Red and Green Color Vision Deficiency: A Review, and a Query on Selection Relaxation, Social Biology, 1962, vol. 9, no. 3, pp. 131-146.
- [8] “ぷよぷよ”. <https://puyo.sega.jp/portal/index.html> (参照 2022-10-4)
- [9] “Splatoon3”. <https://www.nintendo.co.jp/switch/av5ja/index.html> (参照 2022-10-4)
- [10] “League of Legends”. <https://www.leagueoflegends.com/ja-jp/> (参照 2022-10-4)
- [11] “Dead by Daylight”. https://store.steampowered.com/app/381210/_/?l=japanese (参照 2022-11-4)
- [12] Nelson, R. A., and Strachan, I.. Action and Puzzle Video Games Prime Different Speed/Accuracy Tradeoffs, Perception, 2009, vol. 38, no. 11, pp. 1678-1687.
- [13] Salen, K.. Gaming Literacies: A Game Design Study in Action, Journal of Educational Multimedia and Hypermedia, 2007, vol. 16, no. 3, pp. 301-322.
- [14] 岡部正隆, 伊藤啓. 色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼンテーション (全3回) 第1回色覚の原理と色盲のメカニズム, 細胞工学, 2002, vol. 21, no. 7, pp. 733-745.
- [15] Dalton, J.. Extraordinary Facts Relating to the Vision of Colours: With Observations, Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester, 1798, vol. 5, no. 1, pp. 28-45.
- [16] McIntyre, D.. Colour Blindness: Causes and Effects, Dalton Publishing, 2002, vol. 79, no. 8, pp. 476-477.
- [17] Hilbert, D. R.. What Is Color Vision?, An International Journal for Philosophy in the Analytic Tradition, Philosophical Studies, 1992, vol. 68, no. 3, pp. 351-370.
- [18] Stockman, A., MacLeod, D. I. A., and Johnson. N. E.. Spectral Sensitivities of the Human

- Cones, *Journal of the Optical Society of America A*, 1993, vol. 10, no. 12, pp. 2491-2521.
- [19] 岡部正隆, 伊藤啓. 色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼンテーション (全3回) 第2回色覚が変化すると, どのように色が見えるのか?, *細胞工学*, 2002, vol. 21, no. 8, pp. 909-930.
- [20] 岡部正隆, 伊藤啓. 色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼンテーション (全3回) 第3回すべての人に見やすくするためには, どのように配慮すればよいか, *細胞工学*, 2002, vol. 21, no. 9, pp. 1080-1104.
- [21] 太田安雄. 色覚検査の歴史 (1), *日本色彩学会誌*, 2005, vol. 29, no. 1, pp. 54-63.
- [22] Pinckers, A., Nabbe, B., and Vossen, H.. Standard Pseudoisochromatic Plates part 2, *Ophthalmologica*, 1985, vol. 190, pp. 118-124.
- [23] Haskett, M. K., and Hovis, J. K.. Comparison of the Standard Pseudoisochromatic Plates to the Ishihara Color Vision Test, *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 1987, vol. 64, no. 3, pp. 211-216.
- [24] Ozgur, O. K., Emborgo, T. S., Vieyra, M. B., Huselid, R. F., and Banik, R.. Validity and Acceptance of Color Vision Testing on Smartphones, *Journal of Neuro Ophthalmology*, 2018, vol. 38, no. 1, pp. 13-16.
- [25] “CUD 推奨配色セット ガイドブック第2版”. https://jfly.uni-koeln.de/colorset/CUD_color_set_GuideBook_2018.pdf (参照 2022-11-9)
- [26] Sorkin, N., Rosenblatt, A., Cohen, E., Ohana, O., Stolovitch, C., and Dotan, G.. Comparison of Ishihara Booklet with Color Vision Smartphone Applications, *Optometry and Vision Science*, 2016, vol. 93, no. 7, pp. 667-672.
- [27] “NPO 法人カラーユニバーサルデザイン機構.” <http://www.cudo.jp/> (参照 2022-11-9)
- [28] 藤井千尋. 色のユニバーサルデザインの普及と課題, *東洋大学社会学部社会文化システム学科卒業論文*, 2014.
- [29] Nakauchi, S., and Onouchi, T.. Detection and Modification of Confusing Color Combinations for Red-Green Dichromats to Achieve a Color Universal Design, *Color Research and Application*, 2008, vol. 33, no. 3, pp. 203-211.
- [30] 三末和男. 色空間および色差の理解を助けるツールの開発, *HCI*, 2020, vol. 2020-HCI-187, no. 17, pp. 1-8.
- [31] 三末和男. 色差を考慮した量的データ表現用グラデーションの作成ツール, *HCI*, 2020, vol. 2020-HCI-189, no. 15, pp. 1-8.
- [32] 中内茂樹. 色覚の多様性とカラーユニバーサルデザイン, *照明学会誌*, 2010, vol. 94, no. 3, pp. 181-185.
- [33] Brettel, H., Viénot, F., and Mollon, J. D.. Computerized Simulation of Color Appearance for Dichromats, *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, vol. 14, no. 10, pp. 2647-2655.
- [34] Jenny, B., and Kelso, N. V.. Color Design for the Color Vision Impaired, *Cartographic*

- Perspectives, 2007, no. 58, pp. 61-67.
- [35] “Adobe Photoshop”. <https://helpx.adobe.com/jp/photoshop/using/proofing-colors.html> (参照 2022-11-9)
- [36] 浅田一憲. 色覚異常者の QOL (Quality of Life) を向上させる色覚ツール, 慶応義塾大学大学院メディアデザイン研究科博士論文, 2010.
- [37] “iTunes Store”. <https://www.apple.com/jp/itunes/> (参照 2022-11-9)
- [38] Tanuwidjaja, E., Huynh, D., Koa, K., Nguyen, C., Shao, C., Torbett, P., Emmenegger, C., and Weibel, N.. Chroma: A Wearable Augmented-Reality Solution for Color Blindness, *Pervasive and Ubiquitous Computing*, 2014, pp. 799-810.
- [39] 宮澤佳苗, 中内茂樹, 篠森敬三. カラーユニバーサルデザインツールとしての色弱模擬フィルタ, *日本色彩学会誌*, 2008, vol. 32, no. 1, pp. 31-36.
- [40] 篠森敬三, 中内茂樹. 色弱模擬フィルタを用いた印刷におけるカラーユニバーサルデザインの推進, *日本印刷学会誌*, 2016, vol. 53, no. 3, pp. 193-202.
- [41] 前川満良. 色識別装置「カラートーク」の開発とその利用について, 第 16 回リハ工学カンファレンス, 2001, pp. 77-80.
- [42] 前川満良. カラートーク開発におけるニーズ発端から実用化まで, *バイオメカニズム学会誌*, 2002, vol. 26, no. 4, pp. 177-181.
- [43] Ichikawa, M., Tanaka, K., Kondo, S., Hiroshima, K., Ichikawa, K., Tanabe, S., and Fukami, K.. Web-Page Color Modification for Barrier-Free Color Vision with Genetic Algorithm, *Lecture Notes in Computer Science*, 2003, vol. 2724, pp. 2134-2146.
- [44] Ichikawa, M., Tanaka, K., Kondo, S., Hiroshima, K., Ichikawa, K., Tanabe, S., and Fukami, K.. Preliminary Study on Color Modification for Still Images to Realize Barrier-Free Color Vision, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2004, vol. 1, pp. 36-41.
- [45] Kristiadi, D. P., Udjaja, Y., Supangat, B., Prameswara, R. Y., Warnars, H. L. H. S., Heryadi, Y., and Kusakunniran, W.. The effect of UI, UX and GX on video games, *IEEE International Conference on Cybernetics and Computational Intelligence*, 2017, vol. 1, pp. 158-163.
- [46] Ijsselsteijn, W., Nap, H. H., Kort, Y. D., and Poels, K.. Digital game design for elderly users, *Proceedings of the 2007 conference on Future Play*, 2007, pp. 17-22.
- [47] Thompson, D., Baranowski, T., Buday, R., Baranowski, J., Thompson, V., Jago, R., and Griffith, M. J.. Serious Video Games for Health: How Behavioral Science Guided the Development of a Serious Video Game, *Simulation Gaming*, 2010, vol. 41, no. 4, pp. 587-606.
- [48] “Overwatch”. <https://overwatch.blizzard.com/ja-jp/> (参照 2022-11-21)
- [49] “Overwatch 公式フォーラム”. <https://us.forums.blizzard.com/en/overwatch/> (参照 2022-11-21)
- [50] Reinhard, E., Adhikhmin, M., Gooch, B., and Shirley, P.. Color transfer between images, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, vol. 21, no. 5, pp. 34-41.

- [51] Guild, J.. The Colorimetric Properties of the Spectrum, Philosophical Transactions of the Royal Society A, 1931, vol. 230, pp. 149-187.
- [52] Wright, W. D.. A Re-Determination of the Trichromatic Coefficients of the Spectral Colours, Transactions of the Optical Society, 1929, vol. 30, no. 4, pp. 141-164.
- [53] 山中仁寛, 西内信之, 日下俊介, 別府邦江. 色覚異常者のための WEB アクセシビリティの確保と健常者の嗜好性, 日本経営工学会, 2009, vol. 60, no. 1, pp. 40-47.
- [54] 木村敦, 野口薫. 色彩調和研究において実施される色覚検査の選定と手続きについての一提案(その 1) : 石原式色覚検査表の有効性, 日本色彩学会誌, 2006, vol. 30, no. 1, pp. 16-23.
- [55] “Among Us”. <http://www.h2int.com/games/among-us/> (参照 2022-11-9)
- [56] “e スポーツ情報局”, <https://esportsx001.com/esports-game-list/> (参照 2022-12-2)
- [57] “VALORANT”. <https://playvalorant.com/ja-jp/> (参照 2022-12-8)

本論文に関する発表論文

- [1] 藤原 優花, 南里 英幸, 山浦 祐明, 中村 聡史. 眼鏡型計測端末を用いたゲームプレイにおける重要なシーン抽出手法の検討, エンタテインメントコンピューティング 2019, 2019.
- [2] 藤原 優花, 二宮 洸太, 佐々木 美香子, 中村 聡史. 色覚特性によるゲームの有利不利の制御に向けた D 型模擬フィルタを用いた実験による色の基礎検討, 情報処理学会 ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol.2021-HCI-191, No.6, pp.1-8, 2021.
- [3] Yuka Fujiwara, Satoshi Nakamura. Fundamental Study of Color Combinations by Using Deuteranope-Simulation Filter for Controlling the Handicap of Color Vision Diversity in Video Games, 20th IFIP TC14 International Conference on Entertainment Computing (IFIP ICEC 2021), Vol.LNCS 13056, pp.127-138, 2021.
- [4] 藤原 優花, 中村 聡史. 色覚特性によるゲームの有利不利の制御に向けた背景色を考慮した D 型模擬フィルタを用いた実験による色の基礎検討, 第 14 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム, 2022.
- [5] 中村 瞭汰, 藤原 優花, 古市 冴佳, 中村 聡史. 見本のダンス動画に対する手の軌跡の付与が動きの習得に及ぼす影響の調査, 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol.2022-HCI-198, No.11, pp.1-8, 2022.
- [6] 藤原 優花, 中村 聡史. 色覚特性を考慮したゲームの有利不利制御の Among Us を用いた検証, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2022 論文集, Vol.2022, pp.120-128, 2022.