

色立体視のメカニズムに関する研究

— 両眼視差の計測と光線追跡シミュレーションによる検討 —

武岡 春奈*¹ 田中 里枝*² 林 武文*³

要 旨

色立体視は、背景と2色以上の領域で構成される平面パターンにおいて、特定の色が進出あるいは後退して知覚される現象である。そのメカニズムは、眼球光学系の軸外色収差に基づく両眼立体視とされているが、それだけでは十分に説明出来ない現象も報告されている。本研究では、軸外色収差による両眼視差量を実験により求め、背景色による奥行き逆転現象と奥行き量の変化について調べた。また、精密模型眼を用いて光線追跡による数値シミュレーションを行い、実験結果を定量的に説明できることを示した。さらに、自然視の色立体視で顕著な個人差の原因について、シミュレーション結果に基づく考察を加えた。

キーワード 色立体視, 両眼立体視, 光線追跡シミュレーション

The Mechanism of Chromostereopsis

– Measurement of Binocular Disparity and Numerical Evaluation based on Ray-Tracing Simulation –

Haruna TAKEOKA*¹ Rie TANAKA*² Takefumi HAYASHI*³

Abstract

Chromostereopsis is a visual perception where a specific color is perceived closer to or farther from the observer than the other colors in a plane pattern that consists of at least two colors with a background color. The mechanism responsible for this phenomenon is considered to be binocular stereopsis by chromatic aberration of the eyeball optical subsystem; however, previous quantitative evaluations have been unsatisfactory. In this paper, we experimentally and numerically study a reversal phenomenon of the depth by background color and a change in the magnitude of this depth. Furthermore, we discuss individual differences in the depth perception in the chromostereopsis on the basis of numerical simulation results.

Keywords: Chromostereopsis, Binocular vision, Ray-tracing simulation

*¹ 株式会社オービス総研 *² 日本年金機構 *³ 関西大学総合情報学部

1. はじめに

色立体視は、背景と2色以上の領域で構成される平面パターンにおいて、特定の色が進出あるいは後退して知覚される現象である。この現象は古くから知られており、19世紀初頭に出版されたゲーテの「色彩論」^[1]の中には、赤・青あるいは赤・緑のパターンでは赤が浮き上がって見えること、まれに逆の色すなわち青もしくは緑が浮き上がって見える場合があることが記述されている。また、19世紀中頃には、Brewster^[2]により半レンズのプリズム効果を利用した両眼視の実験が行われ、光軸の方向を制御することにより、奥行き量が増減あるいは反転することが報告された。それ以降、色立体視は両眼立体視として捉えられ、心理物理学的な研究が行われてきた。

Vos^[3]は、角膜表面での光の屈折を考慮することにより、軸外色収差（倍率色収差とも呼ばれる）による両眼視差の計算式を導出し、光軸のずれ量と知覚される奥行き量の関係を定量的に説明できることを示した。Kishto^[4]は、プリズムと人工瞳孔を用いて光軸を制御した実験を行い、色立体視が軸外色収差によって生じる両眼視差のみで説明可能であると結論づけた。しかし、眼球光学系の軸外色収差は、ターゲットの照度、水晶体の調節、瞳孔の形状等の影響を受けるため、これらの及ぼす効果に関しても様々な検討が加えられている^[5-10]。さらに、単色ターゲットの照度により奥行きが逆転する現象や無彩色のターゲットでの立体視現象に関しては、Stiles-Crawford効果^[11]を考慮すると説明が可能であることも報告されている^[12,13]。

一方、色立体視の内部メカニズムに関する研究も進められている。サルに対する神経生理学実験により、視覚野のV1とV2において色に応答するニューロンの中には両眼性のものが多く存在し、両眼の奥行きや表面の知覚に関与する他のニューロン群と関係することが明らかにされた^[14]。人間に対する通常の両眼立体視のfMRI、脳波、PETによる研究の見解^[15-17]と比較する形で、脳波を用いた分析が行われ、色立体視には通常の両眼立体視と同様の部位が関与していることが報告されている^[18]。

近年、コンピュータディスプレイを用いて、色立体視の効果を最大限に利用した錯視パターンが北岡^[19]により公表され注目を集めている。また、人工瞳孔やプリズムを用いない自然視の条件下では、背景色によってパターンの奥行きが逆転するなど、軸外色収差のみでは説明し難い現象も新たに報告されている^[20]。さらに、色立体視では、知覚される奥行き量の個人差が大きく、自然視で奥行きが逆転して知覚される観察者が20~30%程度存在するが^[20,22]、その理由に関しても明らかにはされていない。

眼球光学系の色収差に関する計測と理論的な評価は、眼科学や眼光学の分野で行われてきた^[21-23]。そこでは、模型眼を用いた幾何光学に基づく解析が行われ、医療検査や眼鏡レンズの設計論の基礎として利用されている。しかし、基本的には軸上色収差（すなわち、単眼の眼球における色光と焦点調節の計算）に関するものが主流であり、両眼立体視としての視差量を

評価したものは高崎の研究^[23]以外にはほとんど見あたらない。

本研究の目的は、自然視の条件下での色立体視の様々な現象を解明することにある。本研究では、最初に予備実験として、コンピュータディスプレイ上の赤・青パタンに対して知覚される奥行の定性的な評価を行い、先行研究の結果を検証した。次に、色立体視の諸特性の定量的な評価を目的に、光線追跡シミュレーションによりターゲットの網膜像から軸外色収差によって生じる両眼視差を求めた。また、色立体視の両眼視差を心理実験によって直接求め、シミュレーションとの比較を行った。特に、背景色による奥行き逆転現象に注目し、実験結果をシミュレーションにより説明できることを示した。さらに、これらの結果に基づいて、色立体視の個人差の原因が眼球光学系の個人差や視覚系の網膜以降の処理によるものではなく、瞳孔の偏心や位置ずれによる光の遮蔽効果に基づく可能性が高いことを示した。

2. 実験1 (予備実験)

2.1 実験の目的

本研究の実験で用いるコンピュータディスプレイ上の赤・青のランダムドットパタンについて、色立体視の奥行き量と背景色の効果について調査し、先行研究の検証を行った。

2.2 方法

2.2.1 刺激と呈示条件

密度25%のランダムドットによる45×45mmの正方形が14mmの間隔を置いて縦横2×2の計4個配置されたものを刺激とした。図1に示すように、刺激の各対角に位置するパタン同士は対となっており、一対は赤、もう一対は青であった。パタンの背景は、黒と白の2種類を用いた。被験者はこの刺激を、72cmの距離から観察した。この時、刺激全体の大きさは、視角

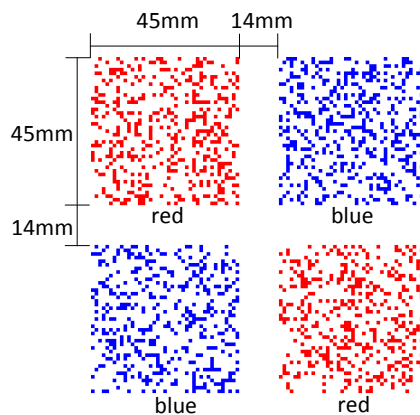


図1 刺激

8.3×8.3°に相当する。

この刺激を以下の2条件で呈示した。

(1) 暗条件

周囲光の影響を全く受けない暗室環境で刺激の観察を行った。ディスプレイ側面から観察位置までを黒色の内張をした箱で覆い、観察の際には被験者は箱から渡された暗幕を被るため、周囲光だけでなくディスプレイへの映り込みも一切遮断した環境であった。図2、図3に実験装置を示す。

被験者は10代後半～20代前半を中心とした47名であり、そのうち半数へは黒背景の刺激を先に、もう半数へは白背景の刺激を先に呈示した。

(2) 明条件

暗条件に対する対照実験として、刺激の白背景の際の背景色に近い周囲環境でも同様の実験を行った。視界に入る領域は全て白布で覆い、ディスプレイから被験者までの上部を白色光で

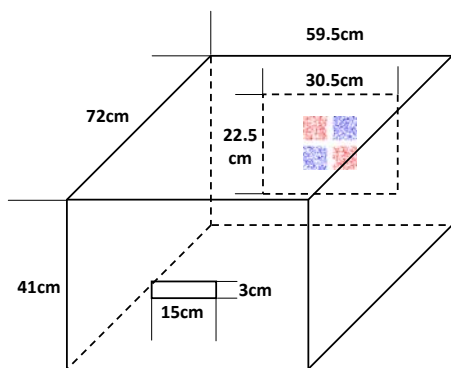


図2 実験装置 (暗条件)



図3 実験の様子 (暗条件)

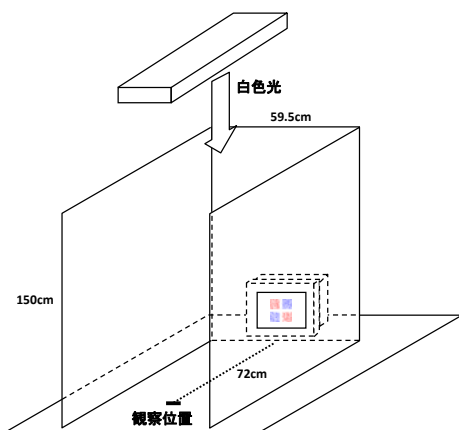


図4 実験装置 (明条件)



図5 実験の様子 (明条件)

均等に照らす環境である。図4、図5に実験装置を示す。

被験者は3名で、いずれも暗条件での実験にも参加した者であった。

2.2.2 手続き

被験者は各設定条件下で刺激を観察し、実験者の質問に口頭で答えた。実験者の質問は、以下の通りであった。

- ・どちらの色が浮き出して見えるか（黒背景刺激・白背景刺激それぞれを観察時に質問）
- ・先の刺激に比べて、奥行き量はどう感じるか（後刺激観察時に質問）

2.3 結果及び考察

暗条件と明条件の両方の実験に参加した被験者の結果から、どちらの条件でも知覚に差がないことが確認された。従って、実験結果として、暗条件の結果を集計した（図6、表2）。ここでは、表1に示すように、観察者のタイプを定義した。「黒背景の時赤が手前・白背景の時青が手前に見えた」被験者は、「赤-青タイプ」と記されている。他のタイプ表記も、「-」の前に書かれている色が黒背景の時、「-」の後に書かれている色が白背景の時手前に見える場合

表1 観察者のタイプ別表記一覧

背景色	黒			
		赤が手前	青が手前	どちらでもない
白	赤が手前	赤-赤タイプ	青-赤タイプ	×-赤タイプ
	青が手前	赤-青タイプ	青-青タイプ	×-青タイプ
	どちらでもない	赤-×タイプ	青-×タイプ	×-×タイプ

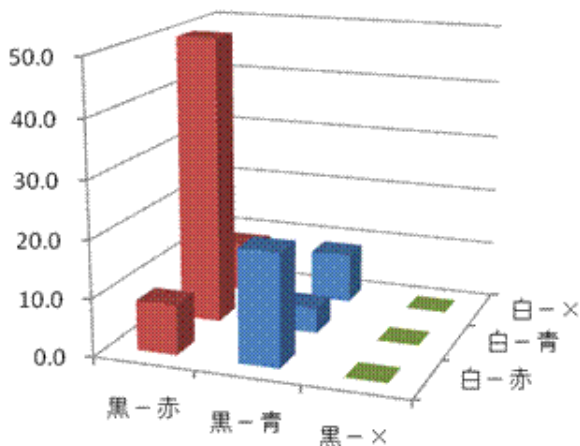


表2 知覚した奥行き量の大小関係

奥行き量	%
黒背景>白背景	97.9
黒背景<白背景	2.1
黒背景=白背景	0

図6 背景色と手前に知覚された色の組み合わせ

を示す。また、“×”は色による奥行き量の違いを知覚できなかった場合である。

実験に参加した被験者のうち黒背景刺激の際に赤を手前に知覚した割合は約70%であり、先行研究^[19,21]とほぼ同じ結果となった。背景色の効果は、白背景と黒背景で多くの被験者がパタンの前後関係が逆転すると答えており、特に赤-青タイプの被験者ではこの傾向が顕著であった。

図6に示すように、完全に逆転するタイプ(=赤-青タイプ、青-赤タイプ)と、白背景刺激の際には奥行きが見えないタイプ(=赤-×タイプ、青-×タイプ)、常に同じ色を手前に見えるタイプ(=赤-赤タイプ、青-青タイプ)が存在した。なお、1名(赤-青タイプ)を除いて全員が黒背景の際に奥行き量を多く感じた。

以上のことから、背景色が黒から白に変化すると全ての被験者において、手前に見えていたパターンは奥方向へ後退する(奥に見えていたパターンが手前に進出してくる)、つまり、前後関係が逆転に向かう知覚がなされたことがわかる。

3. 光線追跡シミュレーション

3.1 模型眼

眼球光学系の各部位の屈折率と境界面の位置・曲率半径を数値として示したものを模型眼と呼んでいる。Gullstrand^[24]やLeGrand^[25]の模型眼がよく用いられるが、最近では、屈折面の非球面性や水晶体の屈折率分布を考慮するなど、より実際の眼球に近いものも提案されている^[26-28]。ここでは、色立体視の基礎特性を調べるため、シンプルな構成で色取差を扱うことが可能なLeGrandの模型眼(精密模型眼)^[21,25]を用いることにした。図7にその模式図を示す。

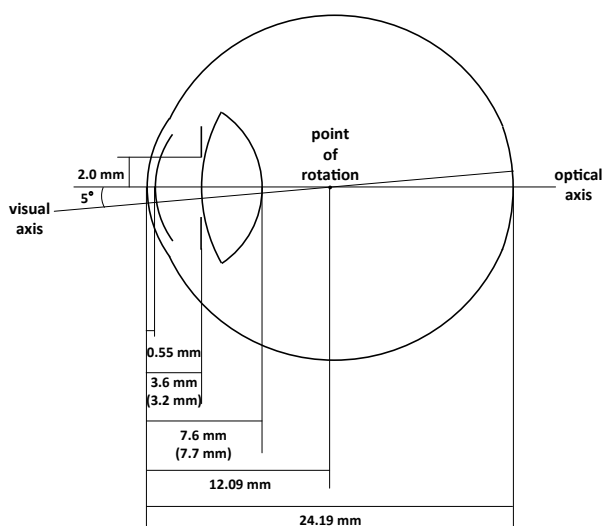


図7 LeGrandの精密模型眼^[21]

表3 各屈折面の曲率半径^[21]

角膜前面	7.8mm
角膜後面	6.5mm
水晶体前面	10.2mm (6.0mm)
水晶体後面	6.0mm (5.5mm)
網膜	12.1mm

このモデルでは、角膜の前面、後面、水晶体の前面、後面および網膜表面を球面で近似しており、最大調節時と調節休止時におけるそれぞれの部位の曲率半径と角膜前面からの位置の数値が与えられている。表3に調節休止時における各屈折面と網膜の曲率半径を示す。ここで()内に示された数値は最大調節時の値であり、本研究のシミュレーションでは調節休止時から最大調節時までの状態を10段階で設定可能としている。図7中の数値は角膜前面からの距離・瞳孔半径・ α 角(視軸と光軸の成す角)を表している。

なお、眼球の回転中心は模型眼の数値として与えられていないが、両眼視における輻輳を考慮するため、眼球の中心(すなわち角膜前面から12.09mm離れた光軸上)に位置するものとし、視軸が常に刺激の中央部に向いているように眼球を回転させた。

3.2 光線追跡計算の方法

刺激パタンの各点から発せられた光が眼球の各部位を透過して網膜上に達した点の位置を求めた。模型眼の前提に従い、眼球の各部位は均質であり、光線の屈折は異なる部位に入射する時の境界面で生じると仮定した。RGBの色光の波長は、基準波長として用いられる水素C線、水銀e線、水素F線の値を用いた。それぞれ、R: 656.27nm, G: 546.07nm, B: 486.13nmである。これらの単色光に対する眼球の各部位の屈折率は表4の通りである^[29]。

各色光の屈折角は、式(1)で示すSnellの法則に従うものとする。

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

ここで、 θ_1 、 θ_2 は入射角と屈折角、 n_1 、 n_2 は媒質の屈折率である。図8に示すように、入射光と屈折光の幾何学的な関係を考慮して式(1)を適用すると、屈折光の方向は式(2)により表される^[30]。

表4 RGBの色光に対する眼球各部位の屈折率^[30]

	R	G	B
角膜	1.3751	1.3787	1.3818
房水	1.3354	1.3389	1.3418
水晶体	1.4175	1.4220	1.4259
硝子体	1.3341	1.3375	1.3404

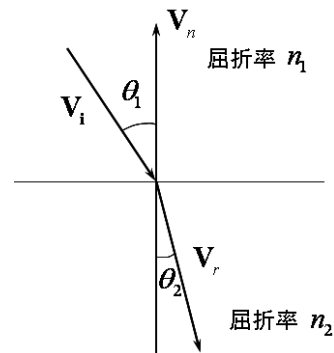


図8 境界面における光線の屈折

$$V_r = (n_1/n_2) \left\{ -(V_i \cdot V_n)V_n + V_i - \sqrt{n_2^2/n_1^2 - 1 + (V_i \cdot V_n)^2} \cdot V_n \right\} \quad (2)$$

ここで、 V_r は屈折光の方向のベクトル、 V_i は入射光の方向ベクトルである。また、 V_n は境界面の法線ベクトルであるが、LeGrandの模型眼では、各屈折面が球面で表されているため（図7、表3より）容易に求めることができる。

本研究では、水平視差のみを対象とするため、眼球の水平断面における2次元の計算を行った。

3.3 両眼視差の計算

両眼視差を求めるためには、左右網膜上に投影された刺激パタンの位置ずれの差異を求める必要がある。ここでは、赤・青パタンが横方向に平行にずれるとみなして、両者の間隔の変化を求めた。

実際の計算は、第4節で述べる心理実験の刺激と観察条件を対象に行った（図13参照のこと）。輻輳角は5.2度（72cm離れたディスプレイの1点を見つめると仮定）、水晶体の調節は網膜上で緑の色光のピントが合う状態で計算を行っている。

刺激の網膜上の結像点の位置として、光軸と網膜円の交点を基準点とし、そこから各結像点までの距離を求めた。網膜も球面（この場合は円）で近似しているため、次式により結像点の位置 l を計算することができる。

$$l = r \cdot \tan^{-1} \left(\frac{y}{x - O} \right) \quad (3)$$

ここで、 x と y は網膜上の結像点の xy 座標の値、 r は網膜の曲率半径（=12.1mm）、 O は網膜の曲率中心（=12.09mm）である。

図9にシミュレーションに用いた刺激パタンの一例を、また図10に左右網膜像の計算結果（図9の中心線での計算計算結果）を示す。刺激の各パタンの端点を右から順にRR・RL・

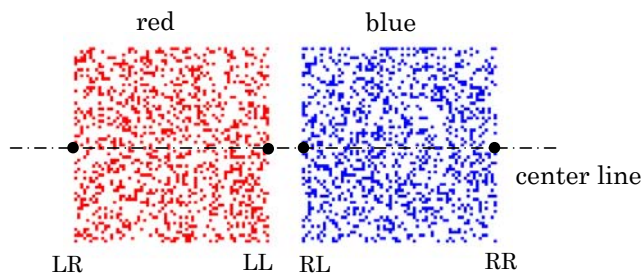


図9 計算に用いた刺激パタンの一例

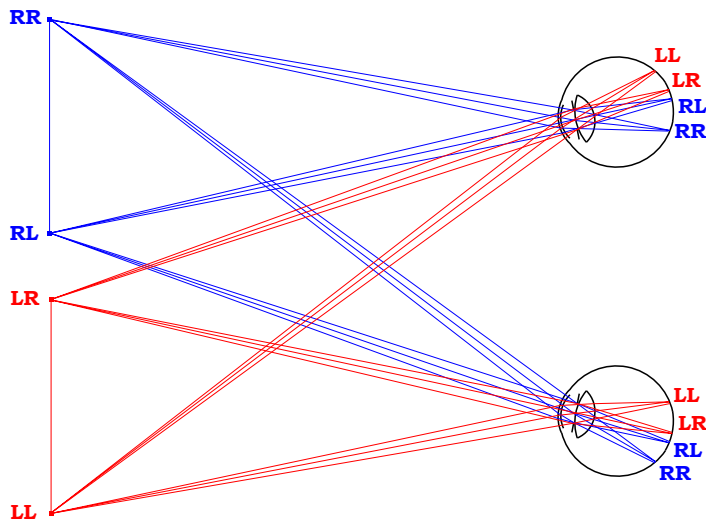


図10 左右網膜像の計算結果

LR・LLとする。これらの点は眼球のレンズを通ることにより、網膜において倒立像を結ぶ。つまり、網膜上では端点の順序が反転し、左から順にRR・RL・LR・LLと並ぶことになる。

(1) 黒背景の刺激パターンに対する計算

RRとRLが青色光の値でLRとLLが赤色光の値、もしくはその逆である。左右眼それぞれでRLとLRの平均値をとり、各点からその値を減じると、刺激の中心を原点とした結像点が得られる。ここで左右眼のRL（もしくはLR）の値の差が両眼視差に相当する。

(2) 白背景の刺激パターンに対する計算

背景色の白には、RGBの全成分が含まれる。そのため、R成分は青のパターン位置以外の全ての場所に、B成分は赤のパターン位置以外の全ての場所に、そしてG成分は赤・青パターン位置以外の場所に存在する。そこで、白背景刺激の場合はパタンの色に関係なく、RR～LLまでの全ての点において赤色光・緑色光・青色光が発された場合の値を用いる。

まず左右眼それぞれで各色光の結像点の値を用いて加法混色を行い、そこからR成分もしくはB成分のみの領域を導き出す。そして導き出した領域の端点を取り、RR～LLとする。以降の処理は黒背景刺激の場合に準じて行うことになる。

この計算の様子を図11で説明する。図の上段は、網膜に映った赤青パターンである。白背景の時、背景にはRGB成分が含まれるので、RGBの色光はそれぞれ、図11左（中央の3段）のようになる。例えば、R成分は青のパターン部分には存在しないので、その部分は欠落し、その後左にずれる。同じことがB成分でも起こる。ただし、B成分は右にずれる。G成分は基準にしているため、欠落するが、ずれない。よって、色光ごとにずれたことで、ずれた部分で混色が

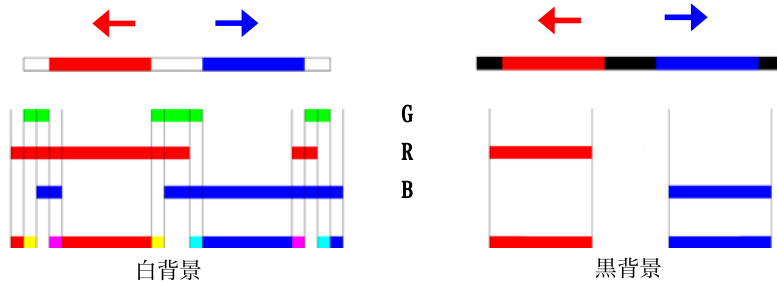


図11 混色の説明図

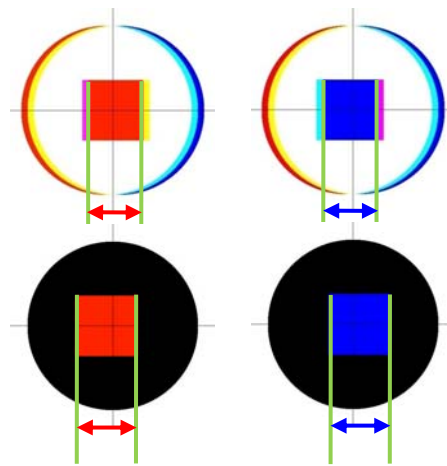


図12 赤・青パタンの位置ずれ

発生する。図11左/下段の左から、 $R+B$ = マゼンタ、 $G+R$ = イエロー、 $G+B$ = シアン、 $R+B$ = マゼンタの混色が発生する。混色が発生することで、網膜上では赤・青それぞれのボタンが、両脇に混色部分が存在するボタンとなる。

黒背景の時（図11右）、ボタン以外の色光は存在しないので、ボタンの色ずれがそのまま現れることになる。混色が発生しないので、網膜上では赤・青それぞれのボタン全体が平行移動して、赤青間距離が開いたボタンとなる。

図12には、赤と青のボタンの結像点が色差によって同量ずれたとした場合の白背景、黒背景におけるボタンの見え方を示している。この図は正確な計算を行っていないが、白背景の場合には、RGBの成分を重疊すると、黒背景の場合と逆方向にボタンがずれることがわかる。すなわち、パソコンのディスプレイを使って背景色を黒から白に変えた場合には逆の視差が生じ、赤と青のボタンの奥行きが反転する現象が定性的に説明されることになる。

4. 実験2 (両眼視差の測定)

4.1 実験の目的

軸外色収差による両眼視差を定量的に求めるために、色立体視が生じる赤・青パタンを両眼に呈示して、赤もしくは青パタンの水平視差を調節し、奥行きマッチングを行った。

4.2 刺激

密度25%のランダムドットによる21.5×21.5mmの正方形を水平方向に7mm離して2つ並べたもの（一方が赤，もう一方が青）を基本図形とし，左眼・右眼用の2対（ステレオペア）をパソコンのディスプレイ上に表示した（図13）。これを立体視鏡により被験者の左右眼に分離して呈示した。刺激の背景色は，黒，白の2種類を用いた。被験者とディスプレイ間の距離は72cmであり，この時刺激パタンの正方形の1辺は，視角6.2°に相当する。

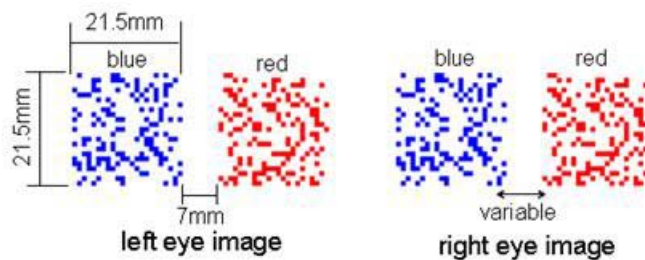


図13 刺激のステレオペア

4.3 実験装置

刺激の呈示には22.2型超高解像度液晶ディスプレイ（IBM T221）を用いた。ディスプレイの解像度は，3840×2400ドット（ドットピッチ0.1245mm），画面のリフレッシュレートは20.5Hzである。ステレオペアの右眼用図形の中の赤・青パタンいずれかをキーボードの矢印キーの操作で左右に動かすことにより両眼視差を変化させた。図14に実験装置の写真を示す。

実験に用いたディスプレイの3原色RGBの色度を色彩輝度計（KONICA MINOLTA CS-200）を用いて計測した。10度視野での計測結果を図15の色度図上に示す。液晶ディスプレイの3原色RGBは，ノイズ成分を含んでいるが計測結果は，単色光のスペクトルに近い位置にあることが分かる。

自然視の状態で行うため，実験室は，通常のオフィス環境と同程度の明るさとした。簡易型照度計による照度の測定値は，318 lxであった。



図14 実験装置

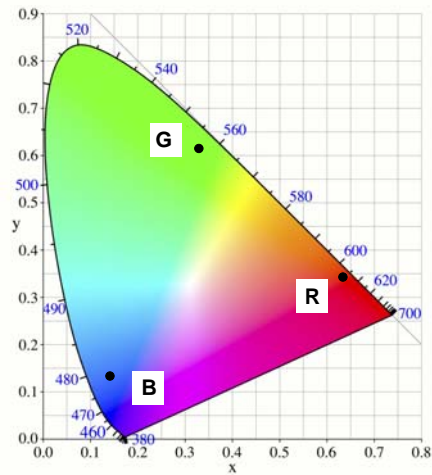


図15 液晶ディスプレイのRGBの色度値

4.4 被験者

大学学部生4名と著者の1名が実験に参加した(内男子3名)。全ての被験者は、裸眼・矯正視力が0.8以上、正常な両眼立体視が可能である。また、本実験では、通常の観察状態で赤色のパタンが進出して見える被験者を予め選別した。

4.5 手続き

最初に、両眼視差ゼロの状態では刺激を呈示した。被験者は、キー操作により、赤、青パタンがちょうど同じ奥行き位置となるように両眼視差を調節した。刺激の並び(赤・青)(青・赤)の2種類に対し、移動させるパタン(右側・左側)2種類の合計4種類の刺激をランダムな順番で呈示して、奥行き位置が同じとなった時のパタンの移動量(画素数)を記録した。黒背景と白背景の刺激に対し、それぞれ合計48回の試行を行った。

4.6 結果および考察

図16に実験により求めた各被験者の両眼視差の値を示す。棒グラフは、48回の試行の平均値を、また誤差棒は標準偏差を表す。グラフの縦軸の正の方向がスクリーン面からパタンが進出し、負の方向が後退するような両眼視差が生じることを表している。個人差があるものの、全ての被験者で、黒背景の時の視差の絶対値が白背景の時より大きな値を示した。被験者毎に、黒背景と白背景の刺激に対する結果の平均値を、t検定により比較したところ、4名に有意な差が確認された(TH: $t=9.36$, $P<0.01$; AS: $t=2.25$, $P<0.05$; YS: $t=3.13$, $P<0.01$; KS: $t=3.29$, $P<0.01$)。このことは、白背景で奥行きが逆転した場合に、知覚される奥行

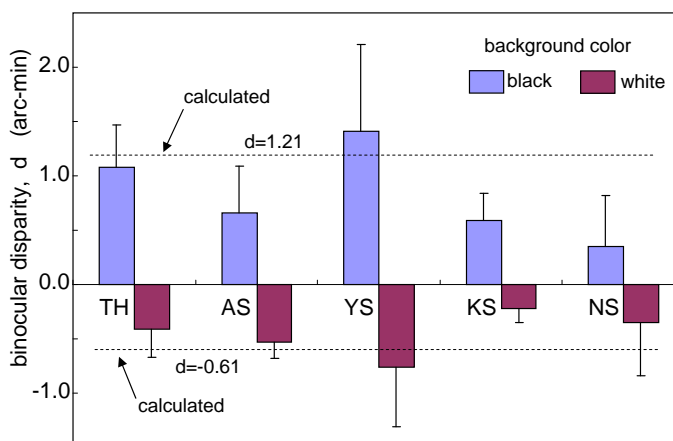


図16 色立体視における両眼視差の値

き量は黒背景の時よりも小さくなることを示している。

光線追跡計算においては、黒背景の場合は、赤と青の色光の屈折率を用いてそのまま両眼視差を計算した。それに対し、白背景の場合には、3.3項で述べた通り、背景部分に含まれるRGBそれぞれの成分について計算を行い、最後に重畳して赤・青パタンの輪郭に相当する部分を求めた。計算の結果、黒背景、白背景で、網膜上の視差は、それぞれ $5.94\mu\text{m}$ 、 $2.99\mu\text{m}$ （視角1.21分、0.61分に相当）であった。図16中に計算結果を破線で示したが、実験結果をよく表していることが分かる。

この結果は、色立体視を軸外色収差による両眼立体視として捉えた場合に、模型眼と幾何光学に基づく光線追跡計算で説明可能であることを示している。

5. 考察（個人差の原因について）

これまで述べた通り自然視での色立体視は、個人差が大きい現象である。黒背景で、赤と青のパタンを観察した場合に、正常な視覚を有する観察者の内、約70%が赤を手前に知覚し、残りが青を手前に知覚するか奥行きを知覚しないという報告がなされている^[18,21]。本研究で多数の被験者を対象に行った予備実験（実験1）でもこの傾向を確認している。また、実験2においては、黒背景で赤が進出して見える被験者を選別しているが、図16に示した結果の通り、色立体視における両眼視差（すなわち進出量）の個人差は大きなものとなった。ここでは、個人差の原因について考察する。

色立体視での個人差の要因としては、①角膜や水晶体の形状の差異、②各部位における屈折異常、③光軸のずれ、④瞳孔の偏心、⑤瞳孔中心のずれ、⑥網膜以降～視覚野の処理の差異、が挙げられる。この内、①に関しては視差の逆転現象を説明するには、角膜や水晶体がマイナスの曲率をもつ必要があり、現実的には考えられない。②に関しては乱視や極端な近視・遠視

を、また③に関しては斜視を伴うことになるが、実験に参加した被験者に対してはこのような影響はほとんど無いと考えられる。⑥に関しても、色立体視のみに大幅な個人差が生じる理由を説明するのは困難である。眼光学系以外の要因で、両眼視差に影響を与えるものとして、④と⑤に挙げた瞳孔による光線の一部遮蔽の効果が原因である可能性が高い。すなわち、レンズの一部の光が遮られると、レンズの片側から斜め入射する光線の影響が大きくなり、軸外色収差の影響も増大することが予測される。

Kitaokaら^[19]は、色立体視の観察時に、両眼の鼻側の部分を遮蔽すると、赤色のターゲットが進出し、耳側の部分を遮蔽すると奥行き関係が逆転して青色が進出することを報告している。また、この現象は、人工瞳孔の位置を変化させた実験^[11,22]でも報告されている。ここでは、

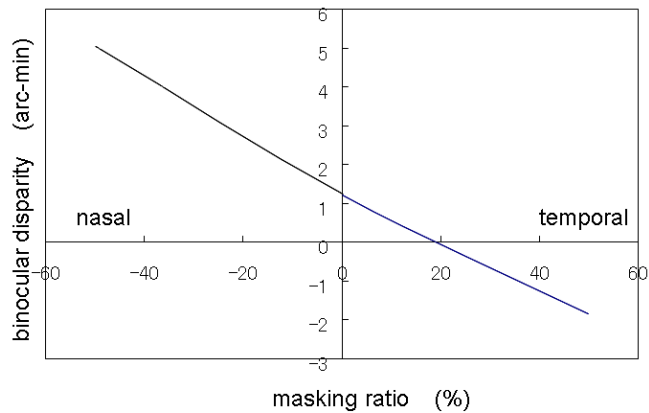


図17 遮蔽の効果 (黒背景の刺激)

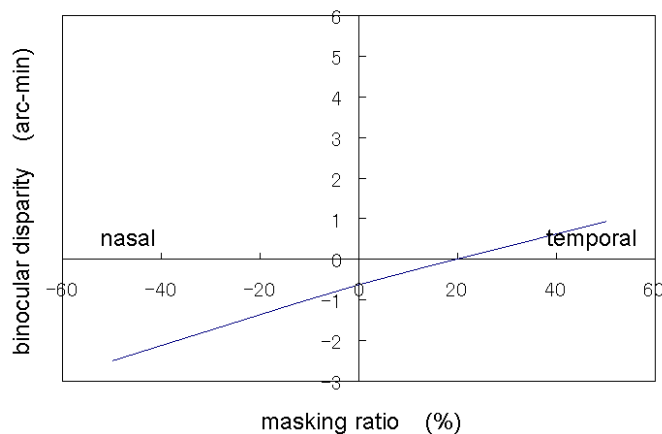


図18 遮蔽の効果 (白背景の刺激)

まず光線追跡シミュレーションによってこの現象の検証を試みた。

図17に、黒背景のパタンに対し、両眼の耳側および鼻側を遮蔽した時の両眼視差の変化を表す。横軸は遮蔽率で、正方向が耳側、負方向が鼻側を同時に遮蔽していることを示す。また、縦軸の両眼視差は、正方向は赤色が進出し、負方向は青色が進出することを示す。原点（遮蔽無し）で生じる両眼視差は、上述の実験2の結果のグラフ（図16）中で縦軸のプラス側に示した値（視角1.21分）である。グラフより、模型眼に近い眼球をもつ観察者は、耳側を20%ほど遮蔽すると視差がゼロとなり、それ以上遮蔽すると奥行きが逆転する。また、鼻側を遮蔽すると赤の進出量が大きくなることを示している。本研究では、正式な実験を行っていないが、被験者に指で耳側、鼻側を遮蔽させたところ、約2倍程度まで進出量が変わるという内観報告を得ており、計算結果が妥当であると考えられる。

図18は、白背景のパタンに対する同じ計算結果である。白背景の場合には、遮蔽率に対する奥行き量の変化は黒背景のパタンとは逆の動き方をし、両眼視差の変化量は黒背景の場合に比べて小さい。白背景の刺激に対しても被験者の内観報告を得ているが、計算結果と傾向がほぼ一致している。

今回の実験からは除外した、青色が進出して見える被験者に耳側、鼻側を遮蔽して奥行きの変化を尋ねたところ、図17の傾向（赤が進出して見える被験者と同じ傾向）が見られた。すなわち、自然視で青が進出して見える被験者は、図17で耳側の光が遮蔽された状況に近いと考えられる。

以上の結果から、色立体視の個人差の原因が、眼球光学系や視覚系の網膜以降の処理によるものではなく、瞳孔の偏心や位置ずれによる光の遮蔽効果に基づく可能性が高いことが分かる。

6. まとめ

本研究では、色立体視の両眼視差量を実験によって求め、光線追跡シミュレーションの結果と比較して両者がよく一致することを示した。また、背景色による奥行きの反転現象についても同シミュレーションで説明が可能であることを示した。さらに、これらの結果に基づき、色立体視の奥行き量や知覚される奥行き方向の個人差の原因が、瞳孔の偏心や位置ずれによる光線の遮蔽効果に基づく可能性が高いことを示した。

心理実験の方法として、今回は調整法を用いたが、被験者によっては、調整している間に輻輳や調節が変わってしまった可能性がある。そこで、恒常法を用いた実験による再検証が必要である。今後は、シミュレーションの精度を上げるとともに、周囲が暗条件あるいは明条件で瞳孔径が変化した状態での評価実験を行う予定である。また、瞳孔の偏心や位置ずれに関する計測データについても何らかの調査を実施したいと考えている。

謝辞

本研究の一部は、平成22年度関西大学重点領域研究助成金において、研究課題「非線形組合せ問題に対する新しい最適化アルゴリズムと応用に関する研究」として研究費を受け、その成果を公表するものである。

文献

- [1] Goethe, J. : Zur Farbenlehre, Tübingen (1810). (ゲーテ, 木村直司訳: 色彩論, ちくま学芸文庫 (2001).)
- [2] Brewster, D. : Notice of a chromatic stereoscope, Philosophical Magazine, Series 4, Vol. 3 (15), p.31 (1851).
- [3] Vos, J. J. : Some new aspect of color stereoscopy, Journal of the Optical Society of America, 50, pp.785-790 (1960).
- [4] Kishto, B. N. : The colour stereoscopic effect, Vision Research, 5, pp.313-329 (1965).
- [5] Sundet, J. M. : The effect of pupil size variations on the colour stereoscopic phenomenon. Vision Research, 12 (5), pp.1027-1032 (1972).
- [6] Owens, D. A. & Leibowitz, H. W. : Cromostereopsis with small pupils, Journal of the Optical Society of America, 65, pp.358-359 (1975).
- [7] Faubert, J. : Colour induced stereopsis in images with achromatic information and only one other colour, Vision Research, 35 (22), pp.3161-3167 (1995).
- [8] Simonet, P. & Campbell, M. C. : Effect of illuminance on the directions of chromostereopsis and transverse chromatic aberration observed with natural pupils, Ophthalmic and Physiological Optics, 10 (3), pp.271-279 (1990).
- [9] Simonet, P. & Campbell, M. C. : The optical transverse chromatic aberration on the fovea of the human eye, Vision Research, 30 (2), pp.187-206 (1990).
- [10] Faubert, J. : Seeing depth in colour: more than just what meets the eyes, Vision Research, 34 (9), pp.1165-1186 (1994).
- [11] 内川恵二, 篠森敬三 (編) : 視覚 I—視覚系の構造と初期機能— (講座 感覚・知覚の科学 1), 朝倉書店, (2007).
- [12] Ming, YE, Bradley, A., Thibos, L. N. & Zhang, X. : The effect of pupil size on chromostereopsis and chromatic diplopia: Interaction between the Stiles-Crawford effect and chromatic aberrations, Vision Research, 21, pp.2121-2128 (1992).
- [13] Sundet, J. M. : Two Theories of Colour Stereoscopy, Vision Research, 16, pp.469-472 (1976).
- [14] Peirce, J. W., Solomon, S. G., Forte, J. D. & Lennie, P. : Cortical representation of color is binocular, Journal of Vision, 8 (3), pp.1-10 (2008).
- [15] Tsutsui, K., Taira, M. & Sakata, H. : Neural mechanisms of three-dimensional vision, Neuroscience Research, 51 (3), pp.221-229 (2005).
- [16] Jeffreys, D. A. : Visual evoked potential evidence for parallel processing of depth- and form-related information in human visual cortex, Experimental Brain Research, 111 (1), pp.79-99 (1996).
- [17] Fortin, A., Ptito, A., Faubert, J. & Ptito, M. C. A. : Cortical areas mediating stereopsis in the human brain: a PET study, Neuroreport, 13 (6), pp.895-898 (2002).
- [18] Cauquil, A. S., Delauxa, S., Lestringanta, R., Taylor, M. J. & Trotter, Y. : Neural correlates of chromostereopsis: An evoked potential study, Neuropsychologia, 47, pp.2677-2681 (2009).
- [19] 北岡明佳 : 北岡明佳の錯視のページ, <http://www.ritsumeai.ac.jp/~akitaoka/index.html> (2010).

- [20] Kitaoka, A., Kuriki, I. & Ashida, H. : The center-of-gravity model of chromostereopsis, *Ritsumeikan Journal of Human Sciences*, 11, pp.59-64 (2006).
- [21] 西信元嗣 (編) : 眼光学の基礎, 金原出版, (1994).
- [22] 白柳守康 : 眼光学系の色収差／眼鏡レンズの度数測定, *光技術コンタクト*, Vol.46, 12, pp.631-639 (2008).
- [23] 高崎宏 : 双眼立体視現象とその利用, *眼鏡の科学*, 2, pp.10-22 (1978).
- [24] Ogle, K. : *OPTICS* C. C. Thomas, Springfield, pp.156-157 (1968).
- [25] LeGrand, Y. : *Form and Space Vision*, Indiana University Press, (1967).
- [26] 白柳守康 : 水晶体の屈折率分布を考慮した模型眼の設計, *日本眼光学学会誌*, 5 (1), pp.40-43 (1984).
- [27] Escudero-Sanz, I. & Navarro, R. : Off-axis aberrations of a wide-angle schematic eye model, *Journal of the Optical Society of America A*, 16, pp.1881-1891 (1999).
- [28] Schwiegerling, J. : *Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics*, SPIE Press, Bellingham (2004).
- [29] 前川佳徳 (編著) : コンピュータグラフィックス (新世代工学シリーズ), オーム社 (2001).
- [30] 日本眼光学学会 (編) : 眼の軸上色収差と眼の倍率色収差, *日本眼光学学会誌*, 15, 別冊, p.41 (1994).