

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo University of Marine Science and Technology (東京海洋大学)

## 2次元画像の奥行き促進効果に関する研究 : 3D酔いの軽減を目指して

著者	董 佳星
学位名	修士(工学)
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2020
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1342/00002098/">http://id.nii.ac.jp/1342/00002098/</a>

修士学位論文

2次元画像の奥行き促進効果に関する研究  
— 3D酔いの軽減を目指して

2020年度

(2021年3月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海運ロジスティクス専攻

董 佳星



修士学位論文

2次元画像の奥行き促進効果に関する研究  
— 3D酔いの軽減を目指して

2020年度

(2021年3月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海運ロジスティクス専攻

董 佳星

# 目次

1. はじめに.....	1
1.1 理論的知識.....	1
1.1.1 S3D.....	1
1.1.2 両眼立体視と幾何学.....	2
1.1.3 ステレオグラムと S3D 提示法.....	3
1.1.3.1 アナグリフ法.....	4
1.1.3.2 ヘッドマウントディスプレイ法.....	5
1.1.3.3 液晶シャッター法.....	6
1.1.4 絵画的奥行き手がかり.....	8
1.1.5 輻輳と調節.....	10
1.1.6 映像酔い.....	11
1.2 改善方法の提案.....	11
2. 実験.....	15
2.1 目的.....	15
2.2 方法.....	18
2.2.1 装置.....	18
2.2.2 手続き.....	20
2.3 刺激.....	21
2.4 変数.....	22
2.5 観察者.....	27
2.6 結果と議論.....	27
2.6.1 実験 1.....	27
2.6.2 実験 2.....	30
2.6.3 実験 3.....	32
2.6.4 実験 4.....	35
3. 全体的議論.....	37
4. 引用文献.....	40
5. 謝辞.....	42
付録.....	43
付録 1: 実験用のプログラム (抜粋).....	43
付録 2: 実験前の教示.....	44
付録 3: インフォームドコンセント.....	46

## 1. はじめに

近年、S3D (stereoscopic three dimensional) 映像を利用し、視聴者にあたかも現実の場面にいるかのような印象を作り出す技術が開発された。この技術は映画やゲームでよく利用されている。しかし、S3D 映像を長時間に見ると、視覚的疲労や不快感も生じることがわかっている。本研究では、①S3D 映像がなぜ私たちに視覚的疲労や不快感をおこさせるのか、さらに②それらをどのようにして改善するのかという問題について研究したい。

### 1.1 理論的知識

本研究では様々な専門用語を使うので、内容を理解していただくために、以下の用語について説明する。

#### 1.1.1 S3D

S3D は英語「stereoscopic three dimensional」の略語であり、立体視的 3次元を意味している。一般に、両眼に別々の画像を提示し、人間に鮮やかな奥行き印象を与える装置 (S3D movie, S3D video, S3D television など) を記述するときに用いられる。これらの装置の例については後で述べる。また S3D 装置を用いて得られた奥行き感、両

眼立体視 (binocular stereopsis) あるいは S3D 知覚と呼ばれる。

### 1.1.2 両眼立体視と幾何学

両眼立体視は、網膜像差 (binocular disparity) と呼ばれる奥行き手がかりによってもたらされる奥行き感である。網膜像差とは近対象と遠対象が両眼に対してなしている角度の差である。図 1 に示してあるように、 $\delta_n - \delta_f$  が網膜像差に対応する。また、図 1 から見ると、 $\delta_n$ 、 $\delta_f$  の関係は (1.1) と (1.2) 式で表される。

$$\delta_n \approx \frac{l}{D} \quad (1.1)$$

$$\delta_f \approx \frac{l}{D+d} \quad (1.2)$$

つまり、網膜像差 ( $\delta$ ) は関係式 (1.3) に解かれる。

$$\delta = \delta_n - \delta_f \approx \frac{l}{D} - \frac{l}{D+d} = \frac{ld}{D^2} \quad (1.3)$$

この式について考えると、 $D$  (観察距離) が一定であれば、 $d$  (奥行き) は、 $\delta$  (網膜像差) に依存して大きくなることを意味している。以上のことは両眼の位置、対象の網膜像差、対象までの距離の幾何学関係を表している。従来の研究結果によれば、人間はほぼその幾何学的関係に従って奥行きを感じるということがわかっている (相田・下野、2011)。

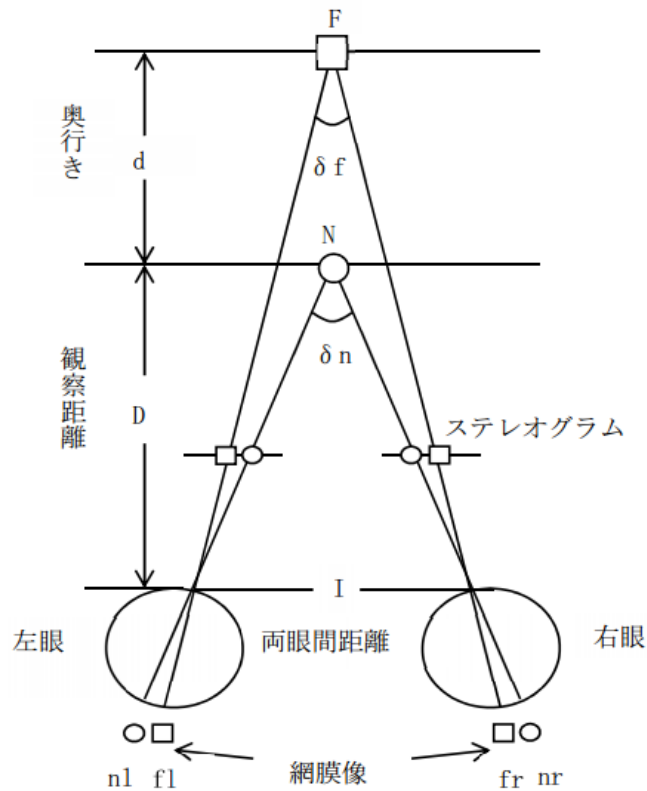


図1. 奥行きを持った対象 (N, F) と両眼が作り出す幾何学的関係 (相田・下野、2011、より引用)

### 1.1.3 ステレオグラムと S3D 提示法

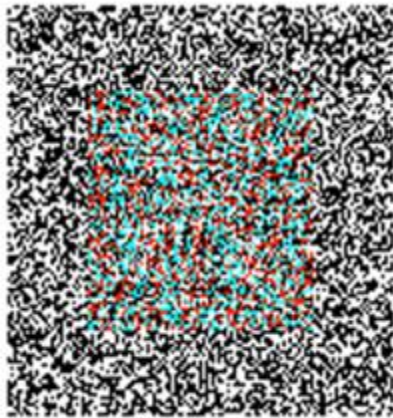
網膜像差は実空間内の対象によってだけではなく、ステレオグラムを使って作り出すことができる。ステレオグラムは図1に示すような、奥行きをもった対象 (NとF) を観察したとき得られる網膜像を、2枚1組の2次元画像でシミュレートしたものである。実際の対象が作り出す網膜像とステレオグラムが作り出す網膜像は同一である。従って、ステレオグラムを観察して得られる対象の奥行き感は、仮想空間



内での3次元印象である。ステレオグラムと同じ原理を用いれば実際は平面の刺激でも奥行きを作り出すことができる。以下に奥行きを作り出す方法（立体視提示法）について説明する。

### 1.1.3.1 アナグリフ法

アナグリフとは図2Aに示すように、左右の眼の画像それぞれを補色関係にある赤と青の2色で合成した画像である。この画像を専用のメガネ（図2B）--たとえば右眼が青、左眼が赤のフィルターからなる--で観察すると奥行きが見える。というのは、このメガネでは、青い画像が右眼の青のフィルターを通過せず、赤い画像が右眼を通過するが、逆に、赤い画像は左眼の赤のフィルターを通過せず、青い画像が左眼を通過する。その結果アナグリフ法では、右眼と左眼で異なる図形をみることができ、網膜像差を持った刺激を1枚の合成した画像で提示できる。例えば、図2Aのランダム・ドット・ステレオグラム（random dots stereogram:以下 RDS）をアナグラフィで観察すると、ドットで構成された背景の中央に、正方形の領域と背景の間に奥行きが見える。



(A)



(B)

図 2. アナグリフ法を使って作成したランダム・ドット・ステレオグラム (RDS) (A) と専用メガネ (B)

### 1.1.3.2 ヘッドマウントディスプレイ法

ヘッドマウントディスプレイ (head mounted display: HMD) 法 (図 3) では左右の眼前に小型ディスプレイが配置され、網膜像差の含まれた映像が提示される。HMD の応用範囲は広く、軍事、医学及び娯楽に使用されている。HMD では凸レンズを通して人の目に見える画像の範囲を拡大する方法で、90~120 度の範囲の画像の視野を作り出せる。さらに、ジャイロスコープなどを使うと人の頭部位置をモニターすることで頭を回転させると画面を更新することができる。その結果、画像の

観察者はサラウンドされた仮想空間を見ているので、360度の三次元空間を感じる。



図3. ヘッドマウントディスプレイ (ITmedia PC USER、2016、より引用)

### 1.1.3.3 液晶シャッター法

液晶シャッター法（時分割法）の3Dメガネ（図4）の各レンズには液晶層が含まれており、作業時にはこの2つのレンズは一定の周波数で交互に開閉し、左右の目からの入力を交互に遮る。ディスプレイはメガネの周波数と一致して左右の目用の画像を交互に表示する。さらに、各フレームの3D画像は、左と右の2つの異なる角度から撮影された画面を含んでいる。具体的に言えば、ディスプレイに左目用の画像が表示されると、その画像が左目のシャッターを通過する。このとき

液晶メガネの右目のシャッターが閉じ、右目では（左目用の）画像は見えない。一方、ディスプレイに右目用の画像が表示されると、その画面が右目のシャッターを通過する。このとき液晶メガネの左のシャッターが閉じ、左目では（右目用の）画像は見えない。人間の脳には一時的に画像を保つ能力があるので、左右の目からの入力を融合して、立体画像を形成できる。このような立体感を実現するには、ディスプレイのリフレッシュ頻度が、一般的には 120HZ 以上であればよいとされている（相田・下野、2014）。周波数が低いと、フリッカー感があり、長時間見ていると気持ちが悪くなる。



図4．液晶シャッター式の3Dメガネ

#### 1.1.4 絵画的奥行き手がかり

一方写真や絵画などの2次元画像を見たときでも、われわれは描かれた場面に奥行きを感じる。このとき得られた奥行きは、一般に2次元画像が持っている手がかり（絵画的手がかり）によってもたらされたと考えられている。絵画的奥行き手がかりは相対的大きさ、遮蔽、陰影、視野内の高さ、肌理の勾配、大気遠近法、線遠近法など種類がある。例えば、図5（A）の写真には相対的大きさと線遠近法が主に含まれている。物理的に同じ大きさで、異なる距離にある対象を同じ画面（2次元画面）に描いたとき、遠くの対象は小さく、近くの対象は大きく見える。図5（A）の場合、描かれた枕木は物理的には同じ大きさだと考えられるので、大きい枕木が手前で、小さい枕木は後ろにあると知覚される。また、線路は線遠近法を使って描かれており、手前の線路の幅が広く消失点に向かってその幅は狭くなっている。図5（B）の写真には遮蔽が主に含まれている。一匹の魚はもう一匹の魚に尾を遮られて、海底のサンゴは二匹の魚に遮られている。つまり、遮られた魚は奥行き方向に中央に位置し、もう一匹は手前で、サンゴは後ろである。図5（C）の写真には陰影が主に含まれている。図の3つの正方形には異なる大きさの陰影が描かれている。陰影がもっとも大きい右端の正方形の場合、背景からもっとも手前に飛び出している。陰影

がもっとも小さい左端の正方形の場合、背景からあまり離れて見え  
ない。この見え方は、人間は奥行きを判断する時、「光は画面の上から  
やってくる」という拘束条件を使うという上方光源位置仮説によって  
説明されている。図5 (D) の写真には視野内の高さが主に含まれてい  
る。視野の上方に描かれた雲は視野の低いところに描かれた木に比べ  
て遠くに見える。日常空間では視野の高いところには遠くの対象が、  
低いところには近くの対象が見えるのが一般的であり、視野内の高さ  
は奥行き手がかりとして知られている。図5 (E) の写真には肌理の勾  
配が主に含まれている。手前のドットは分散し、密度が素であり近く  
見える。後ろのドットは集中し遠く見える。図5 (F) の写真には大気  
遠近法が主に含まれている。大気の影響があるので、後ろの山が薄ぼ  
んやりとしかと見えませんが、手前の木ははっきりと見える。

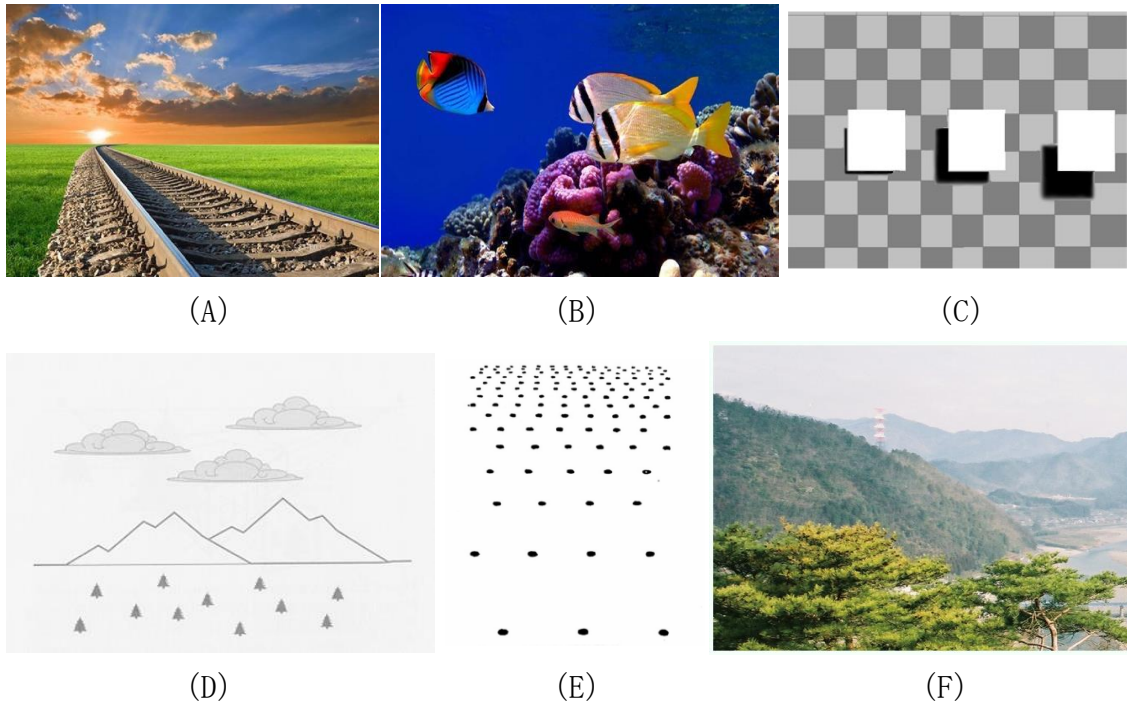


図 5. 絵画的手がかりの例：相対的大きさと線遠近法 (A)、  
 遮蔽 (B)、陰影 (C)、視野内の高さ (D)、肌理の勾配 (E)、  
 大気遠近法 (F)

### 1.1.5 輻輳と調節

上記の網膜像差や絵画的手がかりに加え、奥行きの手がかりには、  
 生理的手がかりと呼ばれるものが知られている。輻輳と調節である。  
 輻輳とは、両眼で対象を注視する時、眼球が内側に寄ったり、外側に  
 広がったりすることである。眼の調節とは、対象を見ている時、ピン  
 トを合わせるために、レンズ（眼の中にある水晶体）の厚さを調節す

ることである。遠くの物を見ている時、水晶体が薄くなり、近くの物を見ている時、水晶体が厚くなる。

### 1.1.6 映像酔い

映像酔いは映像を観察することで生じる頭痛や目眩、嘔吐などの不快感であり、2つに分類される。1つは、激しい画像の動きや明滅を含んだ映像によって生じる。映像が2次元でも3次元でも生じる。この映像酔いの原因ははっきりとはしていないが、一番有力的な仮説は、人間の視覚が捉えている映像の感覚と平衡感覚を司っている三半規管が捉えている感覚のずれによって、映像酔いが発生するというものである（氏家、2007）。もう1つの映像酔いは、立体感を感じる3次元映像（3D映像）を視聴している際に生じるものであり、3D酔いとも呼ばれる。3D酔いの原因もまた明白ではないが、一般に輻輳と調節の不一致にあるといわれている（江本、2002）。

## 1.2 改善方法の提案

しかしながら現在の3D提示法では、輻輳と調節の不一致を除くことはできない。したがって原理的に3D酔いは軽減できないことになる。そこで私は、3D酔い軽減の方法として、2D映像の奥行き促進効果を



応用すること—2次元映像の奥行き促進効果と3D映像を組み合わせることを提案する。

2D映像は輻輳と焦点距離の不一致がないので疲労感や不快感は3D映像に比べ少ない。一方、3D映像に比べ立体感が少ないという欠点がある。従来、2D映像でも奥行き感を増やす方法がいくつか報告されているが、最近、枠効果と呼ばれる奥行き促進効果が報告された (Shimono, Higashiyama, & Aida, 2015)。枠効果は2次元映像の前か後に“枠”を提示するという比較的簡単な方法で得ることができる。私は2次元映像と3次元映像を組み合わせることで、視聴者の立体視体験を保証しつつ、不快感を軽減することができると思う。以下、枠効果について詳しく述べる。

**枠効果 (distant-frame effect)** : 写真に描かれた場面の奥行き感を高めるためにいろいろな方法がある。例えば、鏡やレンズを組み合わせた装置を使って、あるいは単眼で筒を覗きながら写真を観察すると、写真の奥行き感が増加することが知られている (下野・木原・大野, 2017)。このような奥行き促進効果はプラスチック効果と呼ばれている。最近、下野ら (2017) は写真と異なる位置 (写真の前方か後方) に枠を置いた場合でも、写真に描かれた場面の奥行き感が促進

することを報告した。ここでは枠による奥行き促進効果を枠効果と呼ぶ。

以下、枠効果を報告した実験（下野ら、2017）について簡単に説明する。この実験では、同じ写真に異なる奥行きを持つ枠をつけて、5段階の評定値で写真の奥行きを評定させた。図6には1試行ごとの実験手続きが模式的に示してある。実験では被験者がキーボードのスペースキーを押すと、凝視点が1秒提示され、凝視点が消された後に、2秒間写真（枠付き、あるいは枠なし）が提示された。さらにその後、写真の下に「評定値に関する文」（1: no depth - 5: extreme depth）が提示され、被験者は、文が提示されている間に反応した。写真は被験者の反応があるまで提示された。



図6. 実験の手続きの模式図（下野ら、2017、より引用）

その結果が図7に示してある。図の横軸は枠と写真の距離を、縦軸は10名の被験者の20枚の写真に対する平均評定値 (Mean Ratings) である。横軸にはさらに枠がない条件 (No-frame) が示してある。誤差棒は標準偏差である。図に示すように、枠がない場合と枠と写真の位置が一致する (Frame=0) の場合は、“Mean Ratings” の値が一番低い。このことはこれらの条件での奥行き感が最も低いことを意味している。枠は写真の前につけても、後ろにつけても、“Mean Ratings” の値は、前の2つの条件に比べて高くなっている。このことは、枠を付けたことで、写真の奥行き感が増したことを意味している。特に前につけた時、奥行き感が増している。

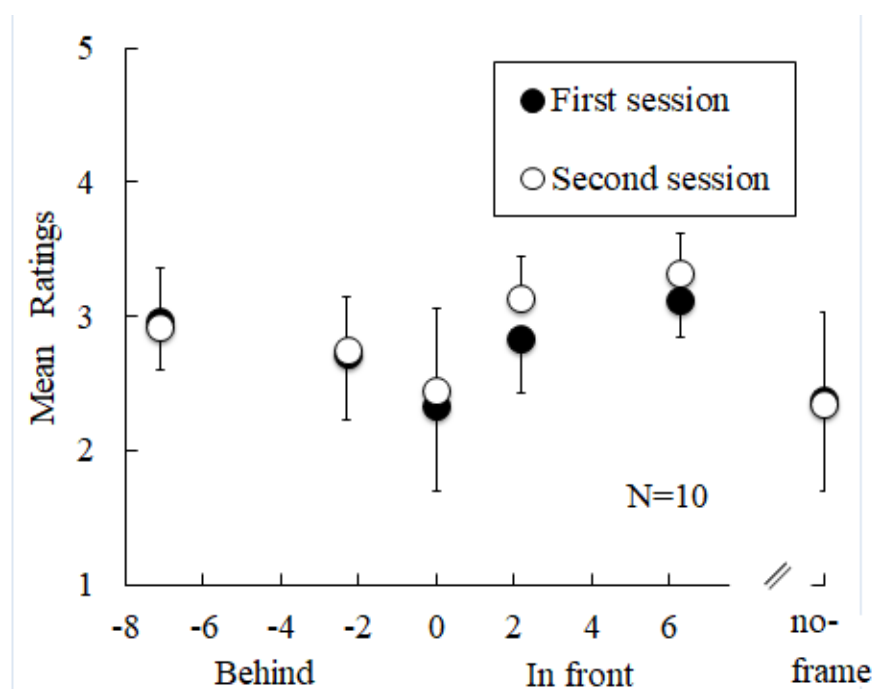


図7. 実験結果 (下野ら、2017、より引用)

## 2. 実験

### 2.1 目的

本研究では3次元画像観察時の視覚疲労を改善するために酔効果に着目した。上に述べたように、3次元の画像を長時間見ると視覚疲労が生じ、その原因は輻輳と調節の不一致とされている（江本、2002）。一方2次元画像は輻輳と調節の不一致がないために。それに由来する疲労感がないと考えられる（激しい画像の動きや明滅によって生じる映像酔いは軽減できない）。したがって、酔効果を組み合わせればより視覚疲労の少ない観察条件で立体的な画像を楽しむことができる。しかしながら、酔効果がどのようなメカニズムで生じているのかはあまりはっきりとしていない。したがって、どのような条件の時に最大になるのか、もわかっていない。本研究では、酔効果を3D映像と組み合わせる前に、酔効果を最大限に引き起こす条件を探ることとした。

本研究で酔効果についての網膜像差—負荷仮説（以下、負荷仮説）（下野ら、2017）の予測を検討した。負荷仮説は、写真の奥行きを処理する時、視覚系は平面的手がかりと絵画的奥行き手がかりを使う、と仮定する。平面的手がかりは写真の奥行きがゼロである。つまり写真が平面である、ということを示す手がかりである。写真の場合、2種類の平面的手がかりが考えられる。ゼロ網膜像差手がかりと自己中

心距離手がかり（輻輳と調節）である。第1章第1節（2）で説明したように、2つの対象間の網膜像差の値がゼロのとき、その対象は同じ平面にあり、奥行きがない。また、ある対象の持つ自己中心の手がかりが一定の場合、つまり、対象への輻輳（角）や調節が一定の場合、その対象は平面であることを示す。一方、絵画的奥行き手がかりは写真が奥行きを持っていることを示す。それらは人間が経験によって獲得した手がかりと考えられており、第1章第1節（4）で説明したように様々な手がかりが知られている。

負荷仮説によれば視覚系は、写真の間の奥行きを処理するとき、平面的手がかりと絵画的手がかりの重みづけを行い、より信頼のおける手がかりに重みをおく。さらに負荷仮説によれば、写真の外側に網膜像差を持った枠が提示されたとき、視覚系の網膜像差を処理するのに必要な負荷（手がかりを処理するための必要な視覚系の“資源”）が増し、結果として、平面的手がかりの1つである網膜像差手がかりの重みづけが低下する。もしこの負荷仮説が正しいとすれば、負荷を増やしてやれば、写真の見かけの奥行き感が増加するはずである。本研究では、枠の網膜像差刺激に関連する変数を操作することでこの予測を調べた。

実験では、RDS の一種である立体透明視ステレオグラムを使った。立体透明視ステレオグラムとは、同じ方向にある、奥行きをもった複数の面が重なって見えるステレオグラムである（相田・下野、2011）。例えば、図8に示すように、赤い円形と青い正方形はそれぞれ等しい網膜像差を持っている。このステレオグラムを融合すると、同じ方向に重なった奥行きを持った2つの面が見える。

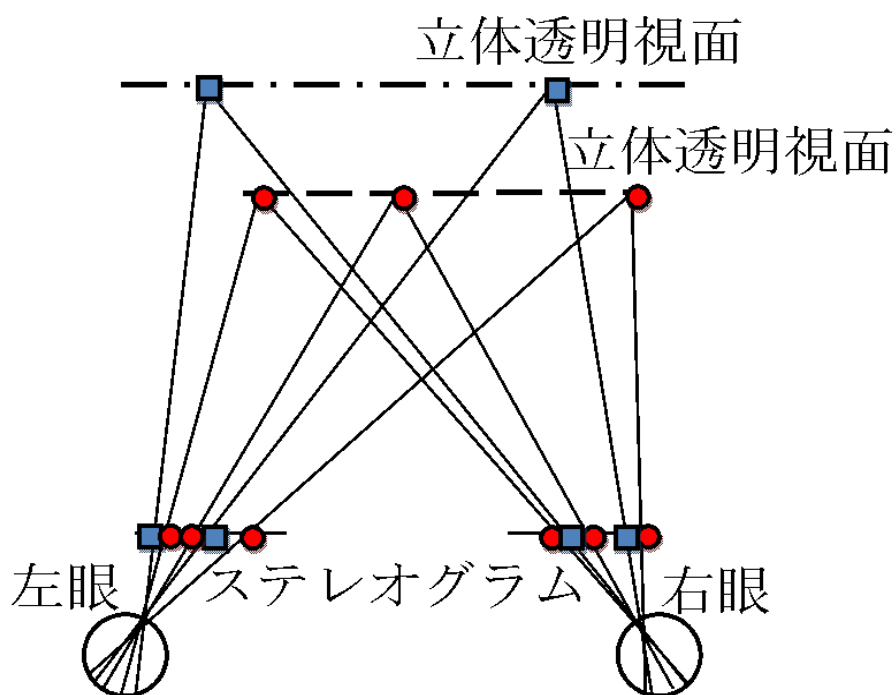


図8．立体透明視ステレオグラムと見かけの面

(相田・下野、2011、より引用)

本研究で操作した変数は、この立体透明視ステレオグラムを構成する要素に関連した4つの変数である。実験1では立体透明視ステレオグラムの要素が持つ網膜像差の大きさ、実験2ではステレオグラムが作る透明視面の数、実験3ではステレオグラムの密度、実験4ではステレオグラムと写真の水平距離である。もし網膜像差の大きさ、ステレオグラムの面数、密度が大きくなるにつれて視覚系の負荷が増えると仮定すると、写真の見かけの奥行きが増加すると予測される。またステレオグラムと写真の距離が増えると視覚系の負荷が減少すると仮定すると、写真の見かけの奥行きが減少すると予測される。

## 2.2 方法

### 2.2.1 装置

使われた装置は3D専用の画像ボードを実装したコンピュータ (Diginnos、GALLERIA XF) と 24.5 インチ 3D 専用ディスプレイ (ASUS、ROG PG258Q) であった。コンピュータのオペレーティングシステムは Windows 10 Pro、64 ビットであった。ディスプレイの解像度は 1920×1080ppi (画素) であり、そのリフレッシュ・レートは 120 ヘルツであった。図9に示すように、ディスプレイの観察距離は 1m であった。ディスプレイは、床からの高さ 75cm の机におかれ、机からディス

プレイの中央までの高さは34cmであった。実験参加者はイスに座り、液晶シャッターメガネをかけ、刺激を観察した。

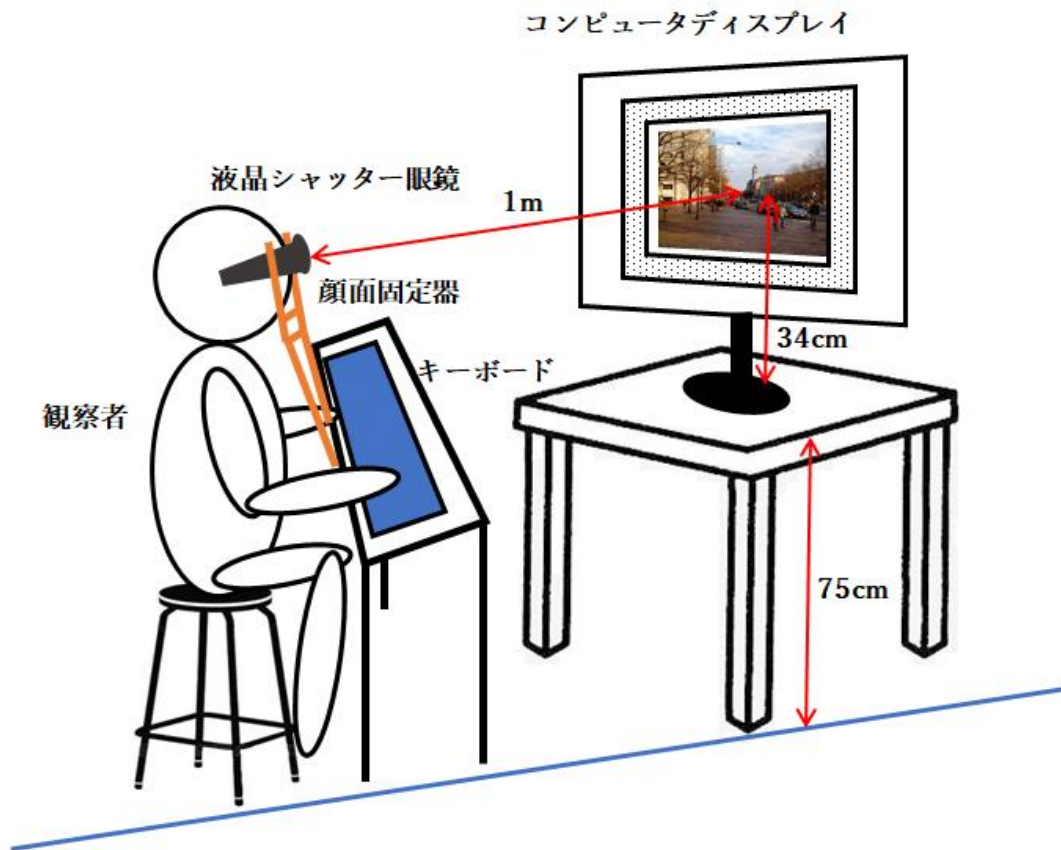


図9. 刺激提示模式図

観察時、実験参加者の顎と頭部は顔面固定器(図10)で固定された。液晶シャッターメガネ(NVIDIA 3D VISION 2 WIRELESS GLASSES)(図11)の各レンズには液晶層が含まれており、観察時にはこの2つのレンズは60ヘルツの周波数で交互に開閉し、左右の目からの入力を交互



に遮った。刺激作成、実験制御、被験者の反応の収集には OCTAVE と Psychtoolbox を使った (付録 1 に実験用のプログラムの抜粋を載せた)。



図 10. 顔面固定器



図 11. 液晶シャッターメガネ

### 2.2.2 手続き

実験参加者の課題は写真の奥行き感を 0 から 4 までの数で評定することであった。“0”は奥行きがない。“1”は少し奥行きが見える。“2”は奥行きが見える。“3”は大分奥行きが見える。“4”はとても深い奥行きが見えることを表している。実験参加者には、写真と枠の奥行きではなく、写真の風景の中の奥行きを答えるように教示した。実験では刺激の提示順序はランダムであった。実験 1 の試行数は全 80 回 (20 写真×4 網膜像差)、実験 2 の試行数は全 80 回 (20 写真×4 面数)、実験 3 の試行数は全 80 回 (20 写真×4 密度)、実験 4 の

試行数は全 80 回 (20 写真×4 距離) であった (教示の詳しい内容については付録 2 を参照のこと)。

### 2.3 刺激

実験では異なる網膜像差を持ったランダム・ドットから構成された枠と写真からなる刺激を表示した。枠を構成するドット要素の大きさは 5 pixel であった。枠の大きさは外側 1050×850 pixel、内側 850×650 pixel であった。実験 1、2、4 ではランダム・ドットの密度は 3.38 dots/deg<sup>2</sup> であった。実験 3 では密度は操作された。写真は刺激の中央に置かれ、その大きさは 800×600 ピクセルの範囲であった。写真は風景と動物 2 種類があり、風景 12 枚、動物 8 枚、全部 20 枚写真であった。写真は、実験者がネット上の著作権フリーの作品から選んだ。選ぶ時には、なるべく様々な奥行き感を与える (写真の奥行き感が浅く感じるものから深く感じるものまで) ものを選んだ。様々な奥行き感を与える写真を選ぶことで、多くの奥行き手がかりについて調べることができる。例えば、実験に使った写真の例を図 12 に示す。奥行きが浅く感じる写真 (左) と奥行きが深い感じる写真 (右) である。左の写真には遮蔽の**絵画的**奥行き手がかりは主に含まれている。右の写真には相対的大きさと遮蔽の**絵画的**奥行き手がかりは主に含まれている。

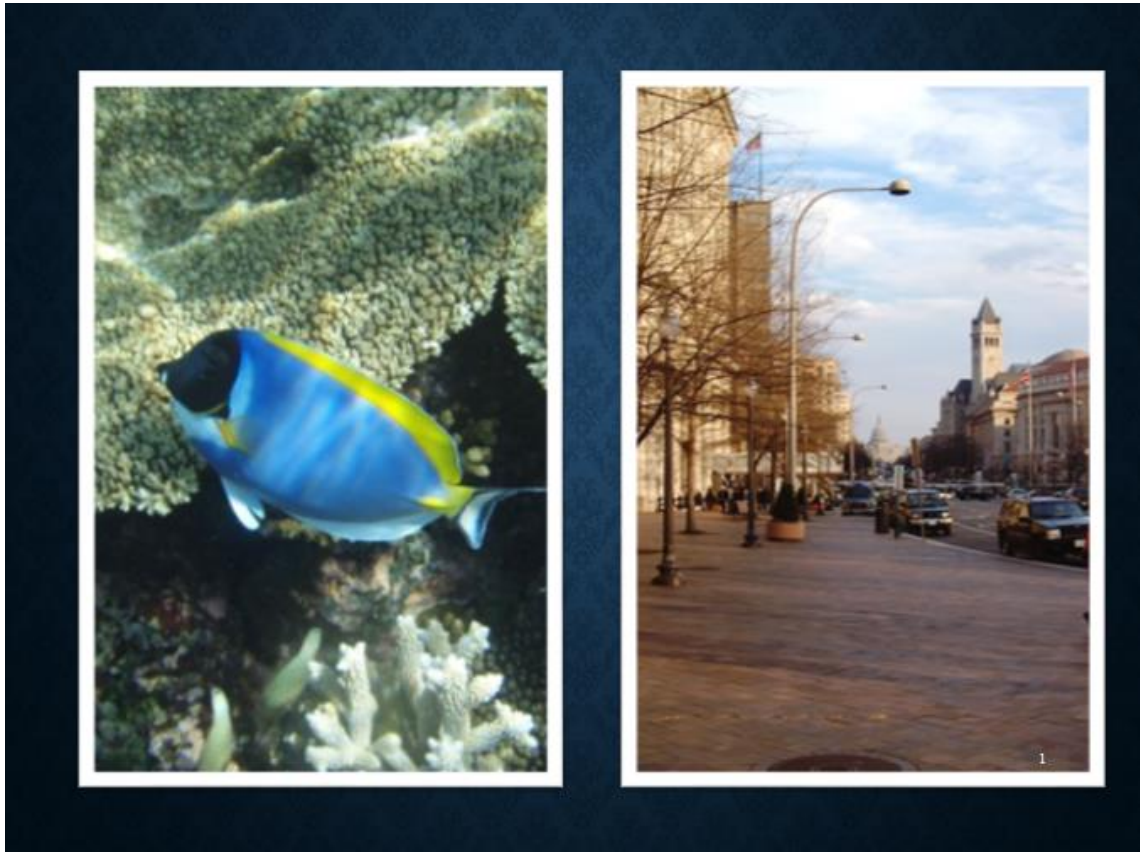


図 12. 実験用の写真（下野ら、2017、より引用）

## 2.4 変数

実験 1（図 13）と実験 2（図 14）の変数は、それぞれランダム・ドット枠の位置（ドットの網膜像差の大きさ）と立体透明視面の数であった。実験 1 で使われたランダム・ドットの網膜像差の大きさは 4 種類 0 pixel, 5 pixel, 10 pixel, 15 pixel である。角度に変換すると、0 pixel の場合、0' であり、5 pixel の場合、9.62' であり、10 pixel の場合、19.23' であり、15 pixel の場合、28.85' である。網膜像差の大きさは枠と写真の距離に対応する。

実験 2 で使われた立体視面の数は 4 種類 1 面 (12 pixel) 、 2 面 (0 pixel, 12 pixel) 、 3 面 (0 pixel, 4 pixel, 12 pixel) 、 4 面 (0 pixel, 4 pixel, 8 pixel, 12 pixel) である。角度に変換すると、1 面 (12 pixel) の場合、23.08' であり、2 面 (0 pixel, 12 pixel) の場合、0' 、 23.08' であり、3 面 (0 pixel, 4 pixel, 12 pixel) の場合、0' 、 7.69' 、 23.08' であり、4 面 (0 pixel, 4 pixel, 8 pixel, 12 pixel) の場合、0' 、 7.69' 、 15.39' 、 23.08' である。つまり、要素のもつ網膜像差の最大値 (画像から一番離れている面を構成する要素の網膜像差) はいずれの “面” 条件でも同じであった。面条件感で異なっていたのは、写真の置かれた面と最も手前の面の間に異なる網膜像差を持った要素がおかれたことである。このとき、要素の密度は同じ (1 面は 900 dots、2 面は 450 dots, 450 dots、3 面は 300 dots, 300 dots, 300 dots、4 面は 225 dots, 225 dots, 225 dots, 225 dots) であった。

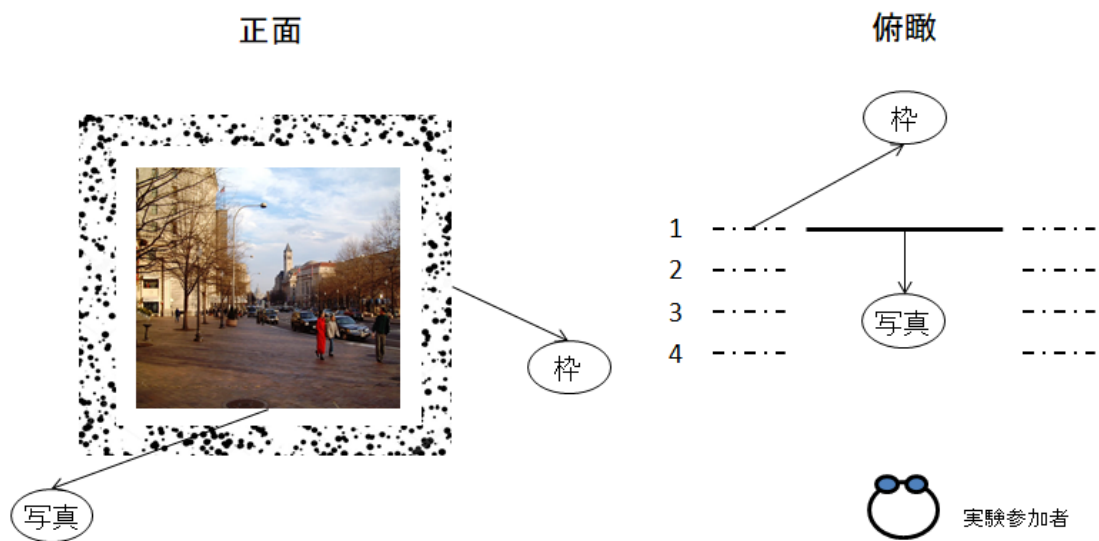


図 13. 実験 1 変数(網膜像差)

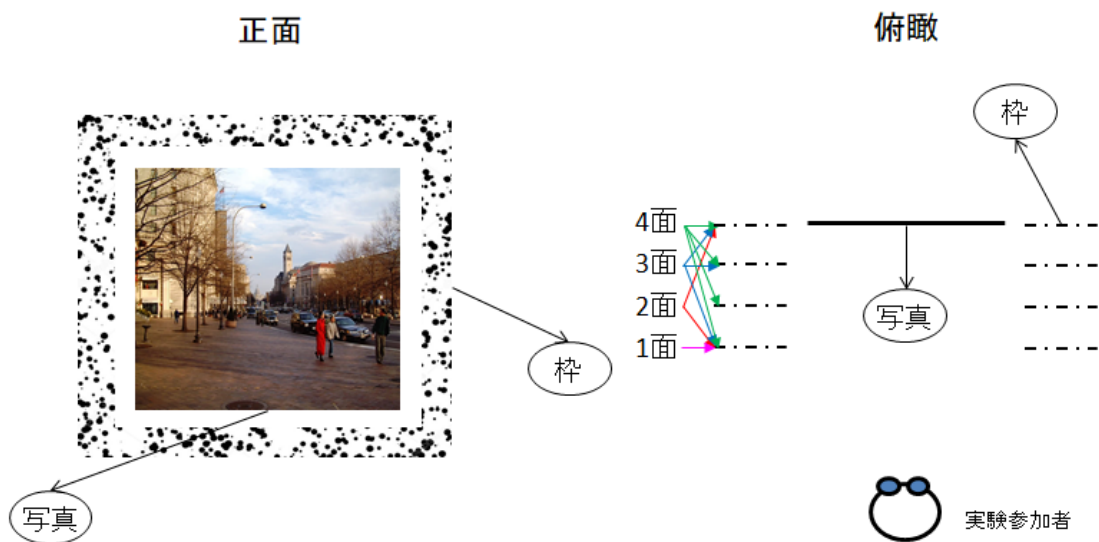


図 14. 実験 2 変数(枠の面数)

実験 3 (図 15) と実験 4 (図 16) の変数は、それぞれランダム・ドット枠の密度 (ドット数) と枠と写真との間の距離である。実験 3 で使われたランダム・ドット枠の密度は 4 種類 (300 dots, 600 dots, 900 dots, 1200 dots) である。単位上の面積に変換すると、300 dots の場合、 $1.13 \text{ dots/deg}^2$  であり、600 dots の場合、 $2.25 \text{ dots/deg}^2$  であり、900 dots の場合、 $3.38 \text{ dots/deg}^2$  であり、1200 dots の場合、 $4.50 \text{ dots/deg}^2$  である。

実験 4 で使われたランダム・ドット枠と写真までの距離は 4 種類である。1 種類は写真までの水平距離が一番近い 25 pixel (枠の外側  $1050 \times 850 \text{ pixel}$ 、内側  $850 \times 650 \text{ pixel}$ )、角度に変換すると、 $23.76'$  であった。2 種類は写真までの水平距離は 50 pixel (枠の外側  $1100 \times 900 \text{ pixel}$ 、内側  $900 \times 700 \text{ pixel}$ )、角度に変換すると、 $47.40'$  であった。3 種類は写真までの水平距離は 75 pixel (枠の外側  $1150 \times 950 \text{ pixel}$ 、内側  $950 \times 750 \text{ pixel}$ )、角度に変換すると、 $71.15'$  であった。4 種類は写真までの水平距離が一番遠い 100 pixel (枠の外側  $1200 \times 1000 \text{ pixel}$ 、内側  $1000 \times 800 \text{ pixel}$ )、角度に変換すると、 $94.78'$  であった。全てのランダム・ドット枠の網膜像差の大きさは同じで、15 pixel であった。

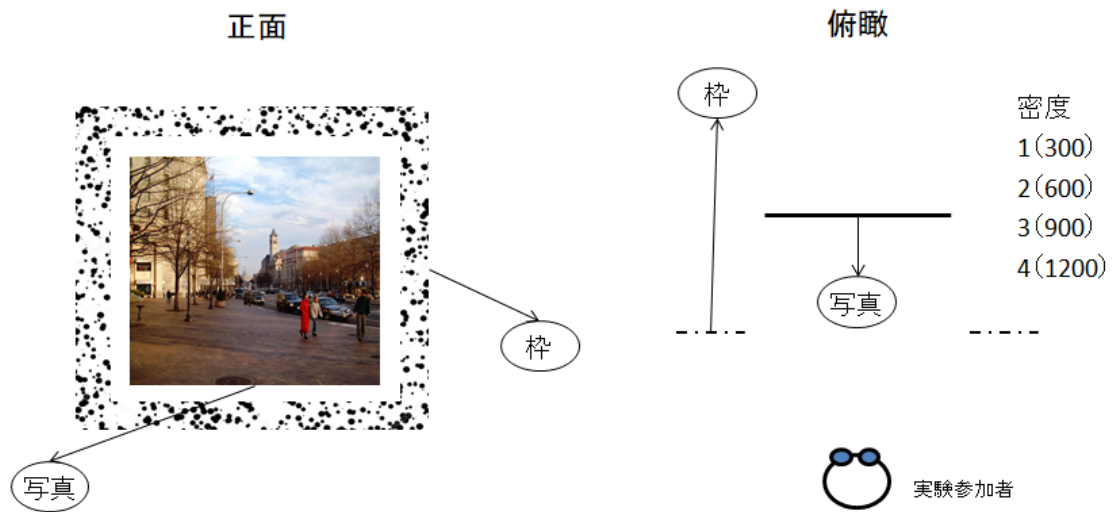


図 15. 実験 3 変数(密度)

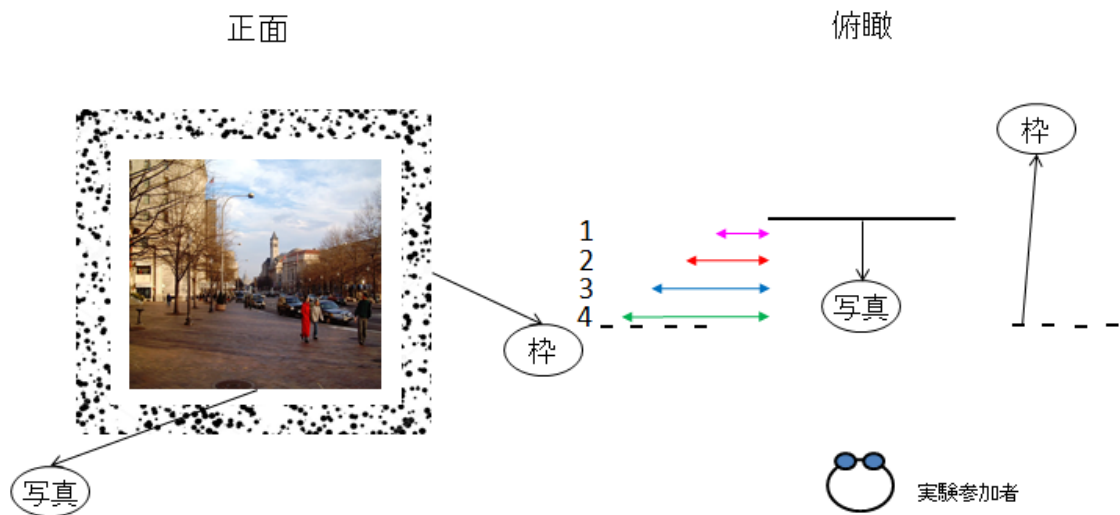


図 16. 実験 4 変数(写真までの水平距離)

## 2.5 観察者

10人が観察者として実験に参加した(男8、女2、年齢20~65歳)。観察者は裸眼または矯正された状態で、いずれも視力は正常であった。実験する前、すべての観察者はチトマス社製立体視力テストを使って立体視力を測り、このテストの答えは3以上に答えられるなら、参加できる。また、実験の前に、被験者には「インフォームドコンセント」を説明した(インフォームドコンセントの詳細い内容については付録3を参照のこと)。観察者は2名を除き実験の目的を知らなかった。実験するとき、5人は実験1、2、3、4の順番で参加して、5人は実験2、1、4、3の順番で参加した。4つの実験が終わるまで約1時間かかった。各観察者はまず10分の練習の後最初の実験と次の実験を行い、20分の休憩を挟んで、3番目と4番目の実験を行った。

## 2.6 結果と議論

### 2.6.1 実験1

実験1では、網膜像差は写真の見かけの奥行きにどのような影響を与えるかを調べた。観察者はそれぞれ4種類の網膜像差をもつ、20枚写真に対して、写真に映った場面の見かけ奥行きを5段階で評定した。われわれは、観察者の報告した評定値を分析した。分析の単位は各観



察者の各条件の評定値の平均である。分析の結果を図 17 に示す。図の横軸は各網膜像差を示している。縦軸は知覚された奥行きの評定値を示している。グラフに付した誤差棒は標準偏差を示している。

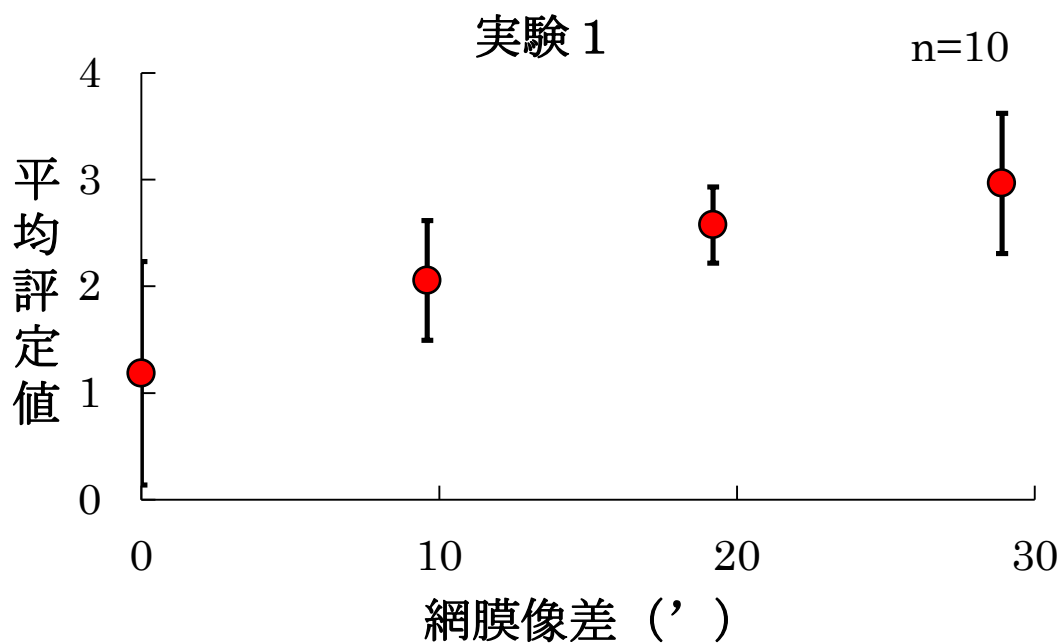


図 17. 網膜像差の影響

このグラフを見ると、3つの網膜像差 (9.62' , 19.23' , 28.85' ) 条件のどの平均評定値も、網膜像差がゼロの場合の平均値よりも大きいことがわかる。網膜像差がゼロの場合、平均評定値は 1.19 (SD=0.99)、網膜像差が 9.62' の場合、平均評定値は 2.06 (SD=0.53)、網膜像差が 19.23' の場合、平均評定値は 2.58 (SD=0.34)、網膜像差が 28.85' の場合、平均評定値は 2.97 (SD=0.62) であった。

これらの知覚された奥行き量の差は統計的分析結果とも一致する。われわれは各被験者の平均評定値に対して1要因の分散分析（網膜像差）を行った。その結果、網膜像差の要因には統計的な有意差があった [ $F(1, 10) = 14.69, p < 0.001$ ]。つまり、少なくとも本実験で写真に網膜像差を持つ枠をつけた場合、枠のない写真と比べて、見かけの奥行き量が大きく知覚された。

さらに多重比較検定 (Ryan's method) を行った結果、網膜像差 9.62' と 19.23' と 28.85' は網膜像差ゼロに有意な差があった ( $p < 0.005$ )。網膜像差 28.85' は網膜像差 9.62' に有意な差があった ( $p < 0.004$ )。一方、網膜像差 28.85' と網膜像差 19.23' の間に有意な差がなかった ( $p > 0.18$ )。また網膜像差 19.23' は網膜像差 9.62' に有意な差がなかった ( $p > 0.07$ )。図から明らかのように、網膜像差の大きさが大きくなると、平均評定値（見えの奥行き印象）が増加している。回帰直線を当てはめたところ、 $y = 0.0608x + 1.3176 \quad R^2 = 0.9655$  となった。これらの結果は、網膜像差が大きくなるにつれ、写真の見かけた奥行きが増えることを示唆している。またこれらの結果は「はじめに」で述べた負荷仮説の予測のどおり、負荷（網膜像差）を増やしてやれば、写真の見かけの奥行き感が増加する。

## 2.6.2 実験2

実験2では、枠の面数は写真の見かけの奥行きにどのような影響を与えるかを調べた。観察者はそれぞれ4種類の立体透明視面数（1面、2面、3面、4面）をもつ、20枚写真に対して、写真に映った場面の見かけ奥行きを5段階で評定した。1面の場合、各面の網膜像差は23.08'であった。2面の場合、各面の網膜像差は0'、23.08'であった。3面の場合、各面の網膜像差は0'、7.69'、23.08'であった。4面の場合、各面の網膜像差は0'、7.69'、15.39'、23.08'であった。われわれは、観察者の報告した評定値を分析した。分析の単位は各観察者の各条件の評定値の平均である。分析の結果を図18に示す。図の横軸は各立体透明視面数を示している。縦軸は知覚された奥行きの平均評定値を示している。グラフに付した誤差棒は標準偏差を示している。

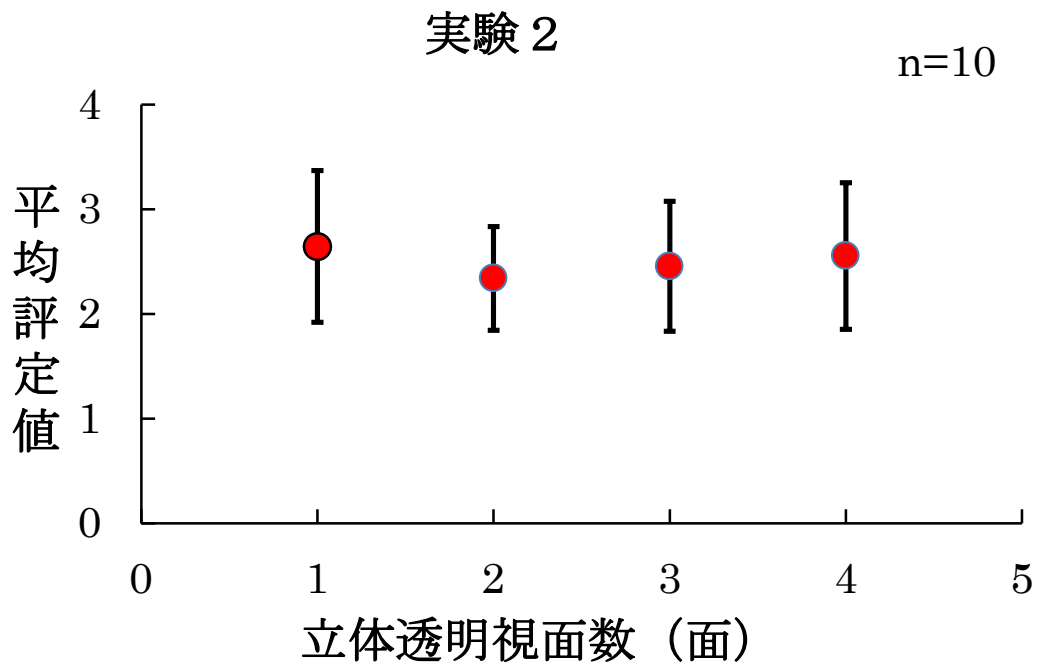


図 18. 立体透明視面数の影響

このグラフを見ると、立体透明視 1 面 (23.08' ) の場合、平均評定値は 2.65 (SD=0.69) 、 2 面 (0' 、 23.08' ) の場合、平均評定値は 2.34 (SD=0.47) 、 3 面 (0' 、 7.69' 、 23.08' ) の場合、平均評定値は 2.46 (SD=0.59) 、 4 面 (0' 、 7.69' 、 15.39' 、 23.08' ) の場合、平均評定値は 2.56 (SD=0.67) であった。

これらの知覚された奥行き量の差は統計的分析結果と一致している。われわれは各被験者の平均評定値に対して 1 要因の分散分析 (立体透明視面数) を行った。その結果、立体透明視面数の要因には統計的な有意差がなかった [ $F(1, 10) = 0.52, p < 0.68$ ]。この結果は「はじ

めに」で述べた負荷仮説の予測と異なり、立体透明視面数は、少なくとも本実験で使われた範囲内では、写真の見かけの奥行き感に影響しないことが示唆された。

### 2.6.3 実験3

実験3では、枠の密度が写真の見かけの奥行きにどのような影響を与えるかを調べた。観察者はそれぞれ4種類の枠の密度をもつ、20枚写真に対して、写真に映った場面の見かけ奥行きを5段階で評定した。われわれは、観察者の報告した評定値を分析した。分析の単位は各観察者の各条件の評定値の平均である。分析の結果を図19に示す。図の横軸は各枠の密度を示している。縦軸は知覚された奥行きの平均評定値を示している。グラフに付した誤差棒は標準偏差を示している。

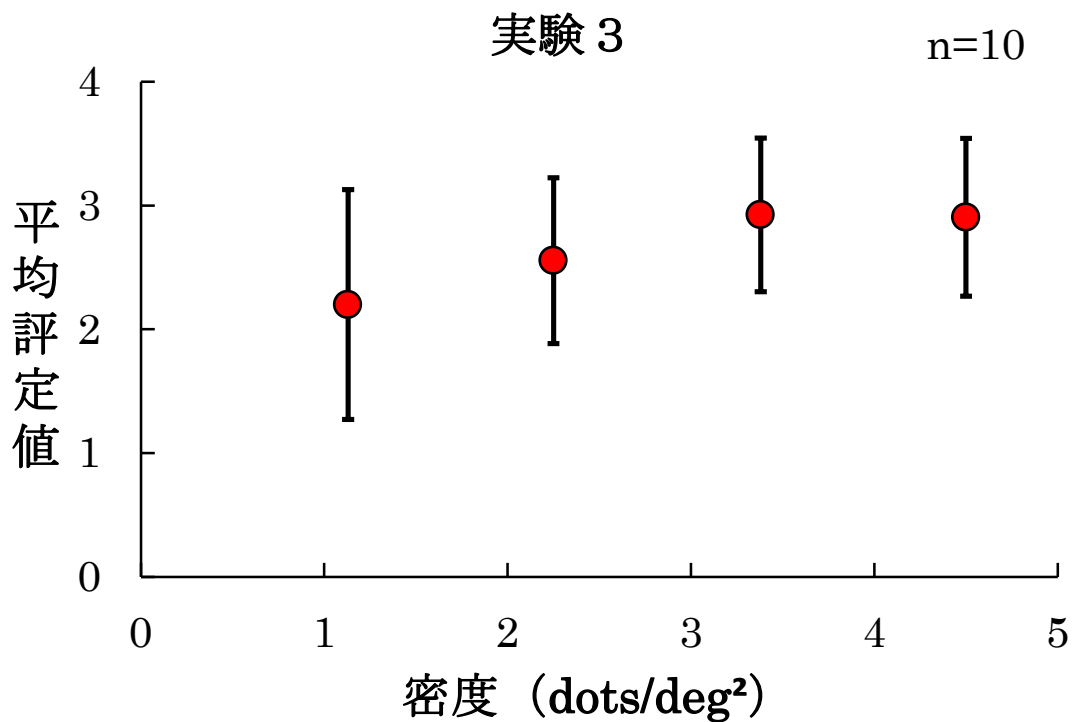


図 19. 密度の影響

このグラフを見ると、3つの密度（2.25 dots/deg<sup>2</sup>, 3.38 dots/deg<sup>2</sup>, 4.50 dots/deg<sup>2</sup>）条件のどの平均評定値も、密度が 1.13 dots/deg<sup>2</sup>の場合の平均値よりも大きいことがわかる。密度が 1.13 dots/deg<sup>2</sup>の場合、平均評定値は 2.20（SD=0.88）、密度が 2.25 dots/deg<sup>2</sup>の場合、平均評定値は 2.56（SD=0.64）、密度が 3.38 dots/deg<sup>2</sup>の場合、平均評定値は 2.93（SD=0.59）、密度が 4.50 dots/deg<sup>2</sup>の場合、平均評定値は 2.91（SD=0.61）であった。

これらの知覚された奥行き量の差は統計的分析結果とも一致する。われわれは各被験者の平均評定値に対して 1 要因の分散分析（枠の密

度) を行った。その結果、枠の密度の要因には統計的な有意差があった [ $F(1, 10) = 7.73, p < 0.001$ ]。つまり、少なくとも本実験で写真に密度を持つ枠をつけた場合、枠のない写真と比べて、見かけの奥行き量が大きく知覚された。

さらに多重比較検定 (Ryan' s method) を行った結果、密度 3.38 dots/deg<sup>2</sup> と 4.50 dots/deg<sup>2</sup> のそれぞれは密度 1.13 dots/deg<sup>2</sup> との間に有意な差があった ( $p < 0.001$ )。一方、密度 3.38 dots/deg<sup>2</sup> と 4.50 dots/deg<sup>2</sup> のそれぞれは密度 2.25 dots/deg<sup>2</sup> との間に有意な差がなかった ( $p > 0.04$ )。また密度 3.38 dots/deg<sup>2</sup> は密度 4.50 dots/deg<sup>2</sup> に有意な差がなかった ( $p > 0.9$ )。密度 2.25 dots/deg<sup>2</sup> は密度 1.13 dots/deg<sup>2</sup> に有意な差がなかった ( $p > 0.05$ )。図から明らかのように、密度が大きくなると、平均評定値 (見えの奥行き印象) が増加している。回帰直線を当てはめたところ、 $y = 0.2211x + 2.0237 \quad R^2 = 0.8774$  となった。これらの結果は、密度が大きくなるにつれ、写真の見かけの奥行きが増える。このことは「はじめに」で述べた負荷仮説の予測と一致する。

#### 2.6.4 実験4

実験4では、枠から写真までの水平距離は写真の見かけの奥行きにどのような影響を与えるかを調べた。観察者はそれぞれ4種類の距離(23.76'、47.40'、71.15'、94.78')をもつ、20枚写真に対して、写真に映った場面の見かけ奥行きを5段階で評定した。1条件は写真までの水平距離が一番近く、23.76'であった。2条件の距離は47.70'であった。3条件の距離は71.15'であった。4条件は写真までの水平距離が一番遠く、94.78'であった。われわれは、観察者の報告した評定値を分析した。分析の単位は各観察者の各条件の評定値の平均である。分析の結果を図20に示す。図の横軸は各距離を示している。縦軸は知覚された奥行きの平均評定値を示している。グラフに付した誤差棒は標準偏差を示している。



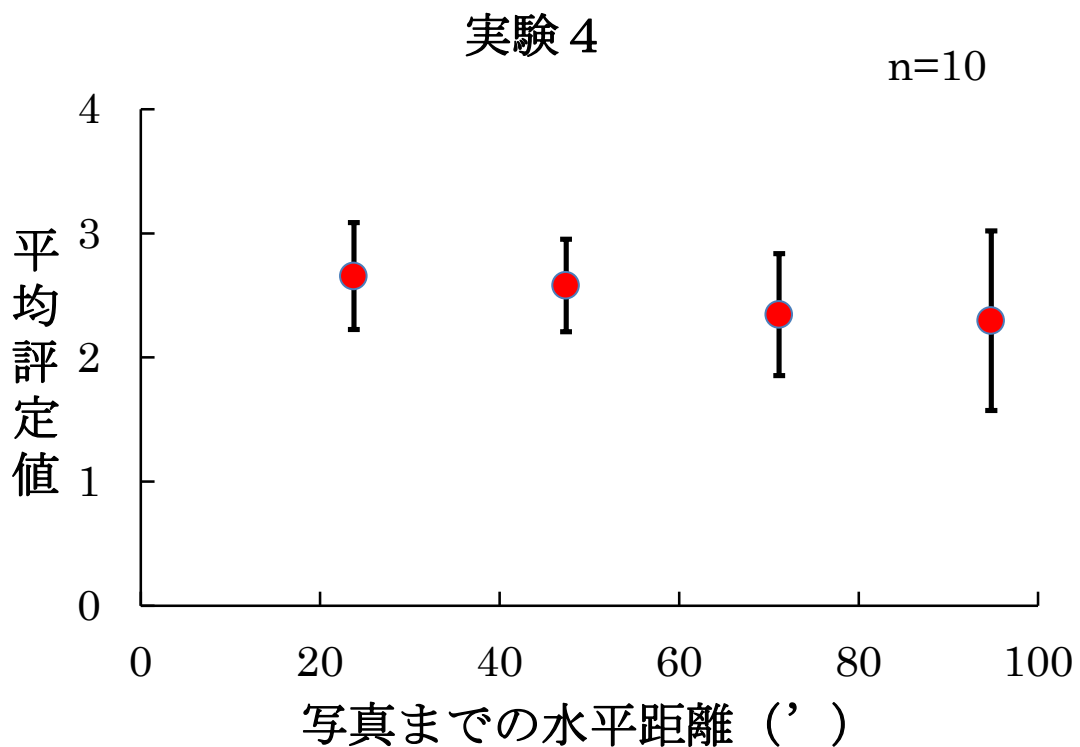


図 20. 枠と写真の距離の影響

このグラフを見ると、1 条件 (23.76') の場合、平均評定値は 2.66 (SD=0.41)、2 条件 (47.40') の場合、平均評定値は 2.58 (SD=0.35)、3 条件 (71.15') の場合、平均評定値は 2.35 (SD=0.47)、4 条件 (94.78') の場合、平均評定値は 2.30 (SD=0.69) であった。

これらの知覚された奥行き量の差は統計的分析結果と一致している。われわれは各被験者の平均評定値に対して 1 要因の分散分析 (枠と写真の水平距離) を行った。その結果、枠と写真の水平距離の要因には統計的な有意差がなかった [ $F(1, 10) = 1.84, p > 0.16$ ]。つまり、

この結果は、少なくとも本実験で使われた刺激の範囲内では枠と写真の水平距離は見かけの奥行き量に影響されないことを示している。

### 3. 全体的議論

本実験の4つ部分から、以下の結論がわかった。まず、実験1では、立体透明視ステレオグラムの要素が持つ網膜像差の大きさは写真の見かけの奥行きに影響を与え、またその網膜像差の大きさが増えると写真の見かけの奥行き感が増加することが示された。また実験2では、ステレオグラムが作る透明視面の数は写真の見かけの奥行きに影響を与えず要素の最大の網膜像差が一定ならば、面数が増えても、写真の見かけの奥行き感に影響しないことがわかった。次に、実験3ではステレオグラムを構成する要素の密度は写真の見かけの奥行きに影響を与え、密度が増えると写真の見かけの奥行き感が増加することがわかった。最後、実験4ではステレオグラムと写真の水平距離は写真の見かけの奥行きに影響を与えないこと、つまり距離が増えても写真の見かけの奥行き感に影響がないことを示した。

以上の結果から、今回の実験は「はじめに」の予測と比べて、実験1と実験3は負荷仮説の予測と一致していた。つまり、立体透明視ステレオグラムの網膜像差と密度は写真の見かけの奥行きに影響を与え、

負荷（網膜像差また密度）を増やしてやれば写真の見かけの奥行き感が増加することがわかった。実験 2 と実験 4 は負荷仮説の予測と異なり、負荷（立体透明視面数またステレオグラムと写真の水平距離）は、少なくとも本実験で使われた範囲内では、写真の見かけの奥行き感には影響しないことが示唆された。

これらの結果からは、負荷仮説を否定も肯定もできない。実験 1 と 3 の結果は予測と一致したが、実験 2 と 4 の結果は予測と一致していない。ただし、実験 2 と 4 で使われた刺激変数が視覚系の負荷にはならない、と仮定すれば、本実験結果は負荷仮説と矛盾するものではない。今後負荷仮説をより洗練させるためには、“視覚系に負荷をかければその処理能力が低下する”という考えが、枠効果だけではなく、他の視覚現象でも当てはまるかを調べる必要があると思われる。

本実験結果は、映像や画面などに立体透明視ステレオグラムの枠をつけると、写真の見かけの奥行き感が増加することを強く示唆するものである。特に本実験によれば、枠効果を最大限に引き起こす条件は立体透明視ステレオグラムの網膜像差と密度であった。つまり、実験で有効性が示された刺激変数をより詳細に調べれば、枠効果と 2D 映像と組み合わせると、映像や画面などの見かけの奥行き感が最大にできる条件が明白にできると考えられる。

しかし、枠効果を3D映像と組み合わせるとしても応用上で考えなければならぬことはまだいくつかある。枠効果を最大限に引き起こす条件はわかったが、その条件は映像や画面の種類でも同じなのか異なるのかはわかっていない。例えば枠効果は、風景、動物、人工物の画像で同じなのだろうか。また枠効果は観察者の特性にどのように影響されるのだろうか。例えば、視力あるいは立体視力が高い人、視力あるいは立体視力が弱い人、色弱の人、色盲の人などではどのように効果に差があるのだろうか。さらにどのような環境で枠効果が影響を与えるかはわかっていない。例えば、室内で光が十分強い場合にも枠効果が生じるか、映画館のような大きなスクリーンでも枠効果が生じるのかもわかっていない。今後の研究が待たれる。

#### 4. 引用文献

相田紗織・下野孝一（2011），立体透明視メカニズムに関する基礎的研究—立体透明視刺激の見かけの奥行き，東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科修士論文（未公刊）。

相田紗織・下野孝一（2014），立体視的3次元（s3D）知覚に関する研究：多重立体透明視面の見かけの奥行きについて，東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科博士論文（未公刊）。

江本正喜（2002），立体画像観視における両眼の輻湊と焦点調節の不一致と視覚疲労の関係，*映像情報メディア学会誌*, 56（11），1803-1812.

ITmedia PC USER（2016），未来はすぐそこに！今熱いVRヘッドマウントディスプレイまとめ（最終閲覧日：2016年4月4日）  
<https://www.google.com.hk/amp/s/www.itmedia.co.jp/pcuser/amp/1604/04/news025.html>

氏家弘裕（2007），知っておきたいキーワード 映像酔い，*映像情報メディア学会誌*, 61（8），1122～1124.

Shimono, K., Higashiyama, A., & Aida, S. (2015), Framing can enhance the perceived depth of a picture, *Perception*, 44, 317.

下野孝一・木原健・大野憺（2017），離れている枠は写真の見かけの  
奥行きを促進する，*日本心理学会大会発表論文集*，日本心理学会  
第 81 回大会，公益社団法人日本心理学会.

## 5. 謝辞

修士論文作成に関して、ご指導いただいた本学下野先生とプログラムの作成にご指導をいただいた文教大学人間科学部実習支援員の草野勉さんに深く感謝致します。また実験に参加して下さった被験者の皆様に深く感謝申し上げます。

## 付録

### 付録 1 : 実験用のプログラム (抜粋)

#### 20 枚写真を読み込む

```
% 写真の数を指定
n_picture = 20;

for i = 1:n_picture
    % 文字と数字を連結(strcat)して、写真のファイル名の文字列を作成
    % num2str関数は、数字を文字列に変換するための関数(iの中身の数字(1~9)を文字列にする)
    filename = strcat('img_',num2str(i),'.jpg');

    % mに写真を読み込み
    m = imread(filename);

    % 読み込んだmをもとに、i番目(iは1から9まで変わる)のテクスチャを作成
    tex(i) = Screen('MakeTexture', window, m);
end
```

#### 異なる網膜像差

```
if condition(1,the_trial) == 1 % 視差なし
    disparity = 0;
elseif condition(1, the_trial) == 2 % 視差が2レベル
    disparity = 5;
elseif condition(1, the_trial) == 3 % 視差が3レベル
    disparity = 10;
elseif condition(1, the_trial) == 4 % 視差が4レベル
    disparity = 15;
end
```

#### 異なる立体透明視面の数

```
if condition(1,the_trial) == 1 % 視差が1面
    disparity = 12;
elseif condition(1, the_trial) == 2 % 視差が2面
    disparity = [0,12];
elseif condition(1, the_trial) == 3 % 視差が3面
    disparity = [0,4,12];
elseif condition(1, the_trial) == 4 % 視差が4面
    disparity = [0,4,8,12];
end
dotNum = 900/length(disparity); % 1面のドット数
```



異なるステレオグラムの密度、網膜像差が一定

```
if condition(1,the_trial) == 1 % 密度が1レベル
    dotNum = 300;
elseif condition(1, the_trial) == 2 % 密度が2レベル
    dotNum = 600;
elseif condition(1, the_trial) == 3 % 密度が3レベル
    dotNum = 900;
elseif condition(1, the_trial) == 4 % 密度が4レベル
    dotNum = 1200;
end
disparity = 15;
```

異なる写真までの水平位置

```
if condition(1,the_trial) == 1 % 水平位置が1レベル
    the_outer_width = 1050;
    the_outer_height = 850;
    the_inner_width = 850;
    the_inner_height = 650;
elseif condition(1, the_trial) == 2 % 水平位置が2レベル
    the_outer_width = 1100;
    the_outer_height = 900;
    the_inner_width = 900;
    the_inner_height = 700;
elseif condition(1, the_trial) == 3 % 水平位置が3レベル
    the_outer_width = 1150;
    the_outer_height = 950;
    the_inner_width = 950;
    the_inner_height = 750;
elseif condition(1, the_trial) == 4 % 水平位置が4レベル
    the_outer_width = 1200;
    the_outer_height = 1000;
    the_inner_width = 1000;
    the_inner_height = 800;
end
```

付録2：実験前の教示

教示は以下のとおりです。

本実験は4つの部分に分けています。

1) この実験では写真に映ったシーンの見かけの奥行きを答えていただきます。

## 2) 練習試行

試行数は20回です。それぞれの写真の見かけの奥行きを0から4までの数字で評定してください。“0”は奥行きがない。“1”は少し奥行きが見える。“2”は奥行きが見える。“3”は大分奥行きが見える。“4”はとても深い奥行きが見えることを意味します。それぞれの数字をキーボードの数字に対応させて（0から4まで）、入力してください。評定するのは写真と枠の奥行きではなく、写真の見かけの奥行きを測定します。

## 3) 実験試行

試行数は80回です。実験試行は練習試行と同じです。それぞれの写真の見かけの奥行きは0から4までの数字をキーボードの数字に対応させて（0から4まで）、入力してください。

## 4) 実験開始

では、実験が始まります。実験参加者は液晶シャッターメガネをかけて、ディスプレイを見てください。実験中は頭が動かないように、あご台に頭をのせたままにしておいてください。実験の操作はまずスペースキーを押すと、試行が始まります。その後試行の評定の数字キ

一を押して、反応してください。これで一回の試行が終わりです。次の試行には、もう一度スペースキーを押してください。同じの操作を順次操作して 80 回の試行が終わりになります。実験 2、3、4 の操作は実験 1 と同じです。

### 付録 3：インフォームドコンセント

#### 「奥行き知覚実験」へ参加して下さる方々（研究協力者）への説明書 (インフォームドコンセント取得のための説明書)

##### (1) 研究概要

###### 研究期間

2020/11/09（月） から 2021/03/31（水）

###### 研究場所

東京海洋大学越中島キャンパス 2 号棟 8 階 813 視覚情報処理実験室（暗室）

###### 研究者

研究責任者 教授 下野孝一

研究担当者 修士 2 年 董 佳星

###### 研究対象者

東京海洋大学の学生及び教職員の中から、無作為に男女合計約 10 人に依頼する予定です。年齢、性別は問いません。

###### 研究意義・目的

本研究では、さまざまな写真やパターンのもつ奥行き感を報告してもらいます。この研究を行うことにより、簡素な 3D 提示技術開発の基礎を作ることができると考えています。

###### 研究方法

3D ディスプレイ上に、2D 写真と（網膜像差をつけることにより）それとは異なる奥行き上にフレームを提示します。研究協力者は 3D メガネを装着し、このとき

知覚する奥行きを評定します。この奥行き評定が、写真の種類もしくはフレームの付けかたによってどのように変化するかを比較・検討します。

3D 提示は 3D ディスプレイ及び 3D メガネを用いて行います。

本研究で得られた応答データ（奥行き評定のデータ）の他に、性別・年齢・立体視能力の有無が実験データとして保存されます。



図. 3D ディスプレイと 3D メガネ

#### (2) 予測される結果（利益・不利益）

本研究に参加するにあたり、研究協力者が直接得る利益はありません。

本研究は 3D ディスプレイ上に映る写真を観察し、知覚される奥行きを応答するだけの実験であるため、特段の身体的負荷はありません。しかし、人によっては多少の眼精疲労や精神的な疲れなどが起こる可能性があります。そのため本研究は、およそ 20 分に 1 度休憩がとれるように設計されています。

#### (3) 研究協力の任意性と撤回の自由

研究協力者は、この研究に協力するかどうかは全くの自由です。また、一度同意されましても、後で破棄することも可能です。

#### (4) 個人情報の保護

得られたデータは、データに付随して記録される研究協力名を「匿名化」して管理します。そのため、個人情報が外部に漏れることはありません。データは研究プロジェクト終了後、最長 5 年間保存されます。

#### (5) 研究成果の公表

得られたデータは、視覚科学に関する学会の講演会、研究会、学術雑誌などで発表する場合があります。ただし、この場合も研究協力者を特定するような情報は一切公開しません。

#### (6) 健康被害への対策など

本研究では、安全に万全を期しています。万が一、実験中健康被害が発生した場合、速やかに適切な医療機関の手配などを行います。

(7) 問い合わせ先

研究責任者：教授 下野孝一

内線：7446

研究担当者：修士2年 董 佳星