

異なる長方形対群の両眼立体視による曲面の錯視について

Illusion of a Curved Surface by Binocular Stereo of Pairs of Distinct Rectangles

大槻 正伸, 小泉 康一, † 大塩 智規‡

Masanobu Ohtsuki, Koichi Koizumi, Tomonori Ohshio

† 福島工業高等専門学校, ‡ 東洋システム株式会社

National Institute of Technology Fukushima College, Toyo System CO.,LTD.

ohtsuki@fukushima-nct.ac.jp

Abstract

With binocular stereo of two distinct rectangles, we can get an illusion image of tilted square like a trapezoid.

We consider the way how to make the illusion of a general curved surface with these tilted squares.

First we constructed a simulator for calculating the illusion image by given pairs of distinct rectangles.

And then we constructed a computer program for making a plane with which we can get an illusion image of curved surface by tilted surfaces.

Keywords — Solid Illusion, Binocular Stereo

1. はじめに

本研究の目的は、「異なる2つの図形（特に異なる長方形の対（図1）の群）の両眼立体視について調べ、（i.e. おおよそその錯視像の脳内計算過程を推定し）またこの立体視により、任意の単純な曲面を立体錯視像として得るための考察の第一歩を行うことである。

そのために今回は下記（1）～（3）を行った。

- （1）比較的単純な、異なる長方形の対の群をディスプレイ画面に表示するためのプログラムを開発する。
- （2）（1）で得た画面を両眼立体視したときの、錯視像を計算するシミュレータを開発する。
- （3）錯視像として得たい曲面を与えて、どのような異なる長方形群によりそれが得られるかを計算し、実際に刺激平面を作成する。
（今回は、全く任意の曲面でなく、ある平面に垂直な曲面＝曲線の柱に限定する）

（2）のシミュレータの結果は、おおよそ実際に認知できる像が得られるので、その脳内計算過程の推定はかなり正確であろうと予想されるが、実際どの程度正確であるかを調べることは、今後の心理物理学の実験で明らかにされるべき課題である。

（3）については、曲線を与え、その曲線柱を両眼

立体視の錯視像として得ることができる刺激（異なる長方形を描いた平面）を作成するアルゴリズムを構成する。より一般的な曲面についての考察は今後の課題として残されている。

本研究の背景には大きく次の2つがある。

まず1つ目は次のことである。

点の融合による立体錯視には、ランダムドットステレオグラム、3Dステレオグラム^{[1][5][6]}がよく知られており、その作成原理もかなり明らかにされている^{[5][6]}。これは、交差法または平行法を用いた、点の融合（以後「融合」という場合にはこの交差法、または平行法による融合、i.e. 同一視をいうこととする）による奥行き知覚を利用した両眼立体錯視である。そして、そこではかなり自由に立体錯視像を制御できる技術も開発されており^[6]、芸術的な作品も多く作られている^[1]。

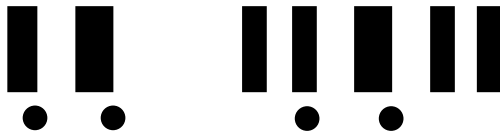
これらは基本的に、同じ点、あるいは同じ図形を融合することによる奥行き知覚を利用している。

一方、異なる図形を交差法、または平行法で融合すると、傾きが知覚できることが知られている。例えば幅の異なる長方形を融合すると、傾きを持った長方形像が知覚される（図1（左））。実は、実際に異なる幅（長さ）の図形の融合でなくとも、錯覚による結果異なる長さが知覚された図形（例：ミュラー・リヤー錯視図形（図2））の融合によっても傾き知覚の錯視が起こることも知られている^[2]。

さて、今回はこのうち実際に幅の異なる長方形の融合による傾き立体錯視に注目する。幅の異なる長方形をうまく配置すると、台形立体（跳び箱のような立体）を知覚させることも可能となる（図1（右））。

それでは、このような手法によって、どのような条件をもつ図形（曲面）がこの種の融合の立体視により、浮かび上がらせることができるのであろうか？ このあたりの条件等を数学的に調べることで、様々な作品（3Dステレオグラムの作品のような多様な作品）を作る

ための数学的基礎を与えることが本研究の先にある大きな目標である。本研究はその第一歩に位置するものと考えられる。





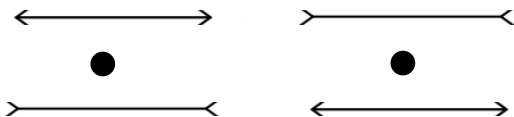
- が3点に見えるようにして交差法で融合すると、
(左) 右辺が手前に ()
(右) 台形立体 () を上方から見たイメージが知覚される。

図1 異なる長方形による傾き錯視



- が3点に見えるようにして交差法で融合するとねじれの位置にある2本の直線「X」を上方から見たイメージが知覚される。

図2 ミュラー・リヤー錯視図形による傾き錯視 (文献[2] から)

本研究のもう一つの背景は、「縦格子とドット平面による立体錯視^{[3][4]}」からのものである (付録1 参照)。これは、縦格子を通して、制御されたドット平面 (小正方形が多数描かれている平面) を自然に (交差法, 平行法等の融合なしに) 両眼視すると, 存在しない帯状立体が知覚される錯視現象である。

この縦格子とドット平面による立体錯視においては, 本研究の主題である, 幅の異なる長方形の (交差法, 平行法等なしの) 融合が生起しているはずであるが, 各小正方形は傾きをほとんど感じない。

この (予測される) 理由は二つ考えられる。

一つには, 小正方形が縦格子により遮蔽されて, 左右眼には, 異なる幅の縦長の長方形がそれぞれ入力され, 融合の機能が働き, 傾いた長方形が認知されているのであるが, 正方形, 長方形が小さく, したがって傾きが小さいため, ほとんど知覚されないという予想。

もう一つは, 小正方形 (小長方形) の傾きは脳内で

計算され, 計算結果としては知覚されるぐらいには十分傾いて見えるはずであるが, 脳内では, さらに傾き計算の後, まわりの小正方形像と比較, 平滑化の処理が行われ, 傾きが知覚されないという予想である。

どちらが正しいのか, あるいは他の理由があるのか等は現在わかっていないが, この判断材料を得ることも, 我々の今後の大きな目標としてある。

以上の二つの動機から, 異なった幅をもつ長方形の傾きの立体錯視について, 上であげた大きないくつかの目標に向かい基本的な考察を行うのが本研究の目的である。

そこで, 前記 (1) (2) (3) を行った。次節以下でこれらについて述べる。

2. 簡単な異なる長方形の両眼立体視

いくつかの幅の異なる縦長の長方形を描くプログラムを作成した。実行結果を図3に示す。

プログラムでは, 左端から青色長方形の幅, 次の白色の長方形の幅, 次の青色長方形の幅...を, ディスプレイの性能にもよるが, 1ピクセルの解像度で (通常のPC等のディスプレイ装置ではおおよそ0.03[cm]程度の解像度で) 正確に表示できるようになっている。

図3では, 最初の合計6個の青色, 白色の長方形の幅 (0.3,0.3,0.3,0.3,0.5,0.5) (単位はcm, 図では, 実際の画面よりも縮小されている) を指定し, それを以降繰り返すものとなっている。

そうして, 画面中央付近には赤色で目印「X」が表示されている。

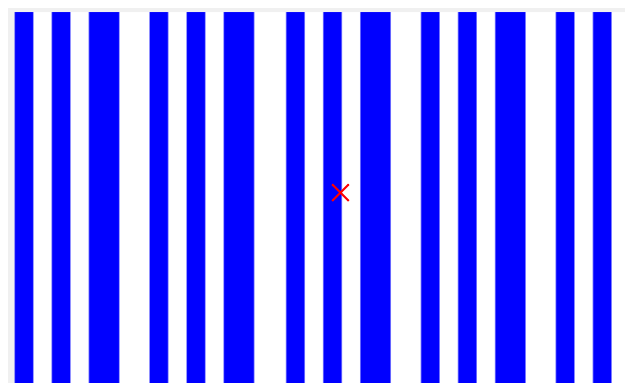


図3 幅の異なる長方形作成結果例

さて, この図3を例えば両眼視し交差法で融合すると, 何種類かの融合ができることが分かる (図4)。例えば, 図3を図4(A)に見えるように融合すると,

刃物のような図形（V）が複数個規則的に突き出しているような錯視像が得られ、(B)のように融合すると、台形立体（∇）が複数個規則的に並んでいるような錯視像が得られ、(C)のように融合すると多少の凸凹はあるが(A)(B)ほど立体が明確でない面の錯視像が得られる(次節シミュレーション結果参照). この融合と錯視像について以下に簡単に考察する.

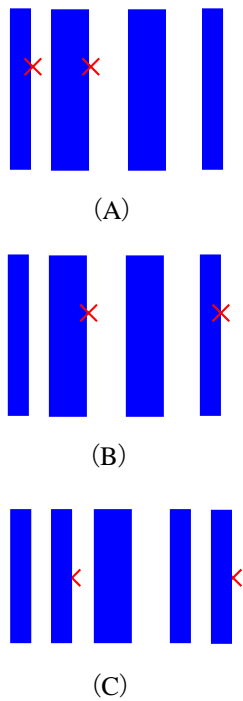


図4 両眼視の融合パターン例

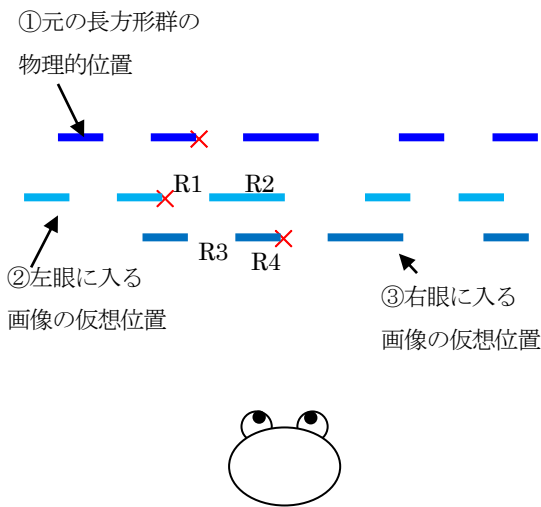


図5 両眼視の交差法の画像位置

図5は、図3の長方形群を交差法で融合し両眼立体

視を行っているところを上方から見たところである（×印はこのまま上から見ると「一」になり、それでは分かりにくいので、×印のみ分かりやすくそのまま「×」として描画してある）.

①が長方形群のもともとの物理的位置である. 交差法の場合、いわゆる「寄り目」にするが、その際左眼からの画像は、元の長方形群の位置よりも、網膜像では右に移動する. これは、②のような仮想位置の長方形群の画像が左眼に入ったものと同等である. すなわち、左眼には、①のもとの長方形群を左にずらした長方形群(②)を左眼に入力するのと同様である. 同様に右眼には、元の長方形群を右にずらした仮想の長方形群(③)を右眼に入力することと同様である. 図4(A)の場合、×印の位置から判断して、図5②③のようなずらし量で左右眼に入力したものと同等であると考えられる.

そうすると、位置関係から、左眼への入力画像の白色長方形R1と右眼への入力画像白色の長方形R3が同一視され融合されることとなる. 同様に青色長方形R2(左眼入力)とR4(右眼入力)が融合される.

この融合の様子を示したのが図6である(白色の長方形の錯視像は白色では目立たないため黄緑色で示してある).

①元の長方形群の物理的位置

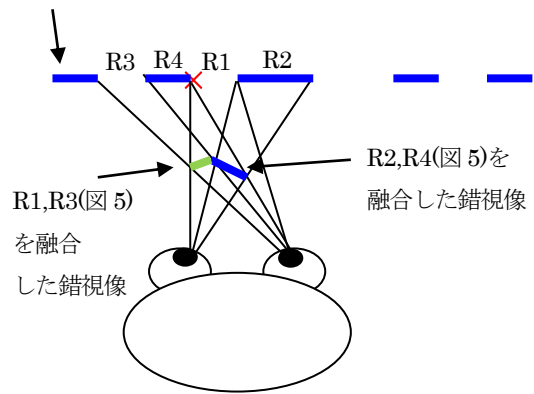


図6 両眼視の交差法による錯視像

図4(B)(C)も同様に考えられるが、この場合交差法のずらし量がそれぞれ異なり、したがって、同一視、融合する長方形の対がことなり、それぞれ異なった錯視像が得られるものと考えられる.

3. シミュレーションプログラム

異なる長方形対群の両眼立体錯視像を、前節の考察

をもとに、交差法のずらし量をも考慮して計算し、表示するシミュレーションプログラムを作成した。

このシミュレーションプログラムは、

- ・長方形群の幅
(「0.3,0.3,0.3,0.3,0.5,0.5[cm]の繰り返し」等)
- ・長方形群描画面と観察者間距離
- ・観察者の眼の幅
- ・交差法か平行法かの選択
- ・ずらし量 (図4 (A) の場合 2, (B) は 4, (C) は 6) = 2つの×の間の長方形数

を入力し、錯視像を前節の考察にしたがい計算し表示するものである(錯視像の線を構成する点の座標も画面下に数値表示する)。

シミュレーションプログラムの実行画面を図7に示す。

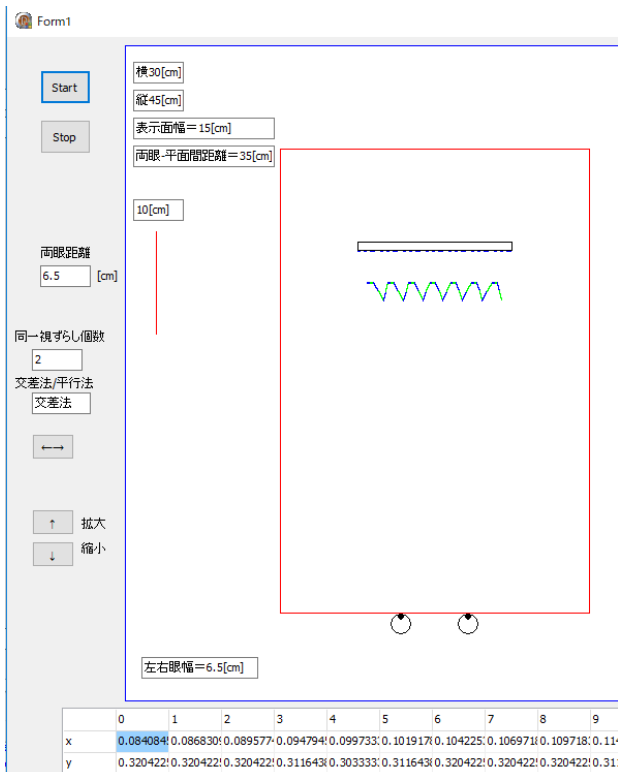


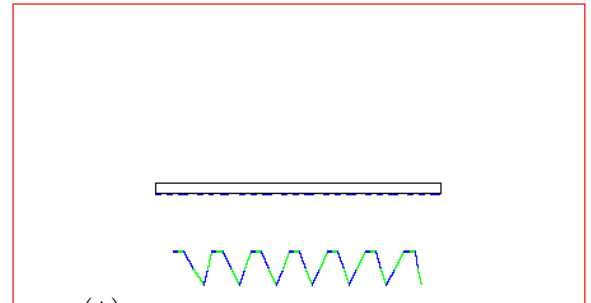
図7 シミュレーションプログラムの画面

また、図4 (A) (B) (C) の交差法に対するシミュレーションプログラム実行例を図8に示す。各種パラメータは図中にあるとおりであり、図8 (A) (B) (C) はそれぞれ、図4の (A) (B) (C) に対応した計算結果である。

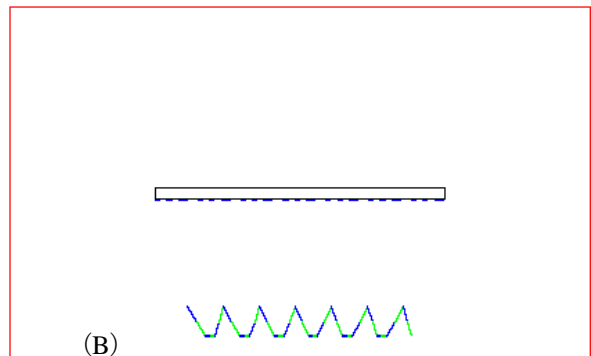
白色の長方形の融合による錯視像は、黄緑の線で示してある。おおよそ、実際に交差法で知覚できる図形

とかなり近い形が計算結果として出てきている。

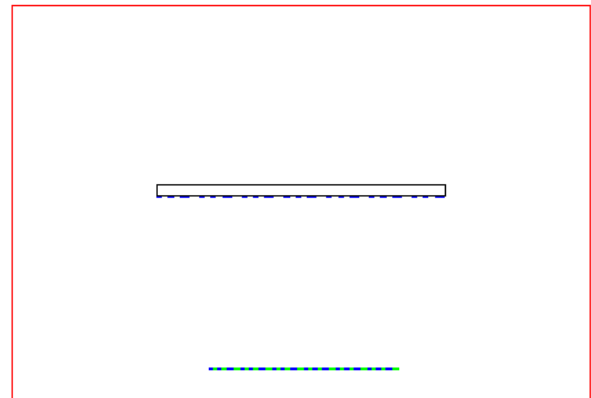
実際の錯視像とシミュレーション結果がどの程度一致しているかは、今後の精密な心理物理学の実験により確認する必要がある。



(A)



(B)



(C)

長方形幅
(0.3,0.3,0.3,0.3,0.5,0.5[cm]) *

交差法

10[cm]

横30[cm]

縦45[cm]

表示面幅=15[cm]

両眼-平面間距離=35[cm]

左右眼幅=6.5[cm]

・ 図4 (A) (B) (C) の条件に対応

図8 シミュレーション結果

4. 錯視曲面の設計法

以上のように、幅の異なる長方形の対の両眼立体視により、傾いた面が錯視像として得られる。しかも、一種類の長方形対の群に対して、融合のずらし量により、何種類もの錯視像が存在する。そして、その錯視像の計算法もおおよそ明らかになった。

以下では、得られる錯視曲面を制御する方法について考察する。すなわち、描きたい曲面があった場合（錯視像として得たい曲面があった場合）どのような長方形をどのように平面上に配置すれば、両眼視によりその曲面を錯視像として知覚させられるか、という問題を考える。

今回は簡単のため、円柱の面のように、ある平面（今回は xy 平面）に垂直な曲線柱の面に限定して考える。

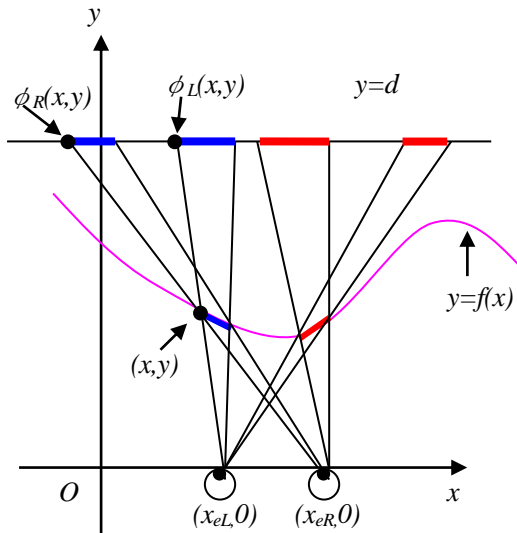


図8 $y=f(x)$ の曲線柱の錯視像を得るための座標系

図8のような x,y 座標系を考える。

左右眼（瞳）の座標をそれぞれ $(xeL, 0)$, $(xeR, 0)$ とする。

$y=f(x)$ という曲線に対する曲線柱を、得べき錯視像とする。

図はこれらを上方から見たところである。

$y=d$ (d は定数) という平面に x,y 平面に垂直な、幅の異なる長方形を配置させることにより、両眼視（今回は交差法とする）により、錯視像を得ることを考える。

今、平面上の点 (x,y) ($y > 0$) を与えたとき、左眼（右眼）から、点 (x,y) に直線を引き、この直線が、 $y=d$ と交わる点を $\phi_L(x,y)$ ($\phi_R(x,y)$) とする、

すなわち、

$$\phi_L(x, y) = x_{eL} + \frac{d(x - x_{eL})}{y}$$

$$\phi_R(x, y) = x_{eR} + \frac{d(x - x_{eR})}{y}$$

所要の曲線 ($y=f(x)$) の柱の曲面を錯視像として得るために、平面 ($y=d$) に長方形を描くアルゴリズムを次のように構成した。

begin

Input (a,b) ; {*[a,b]の範囲の曲面柱を得る*}

h を適当に（小さく）設定；

$n := (b-a)/h$ ；

for $i := 0$ to $(n-1)$ **do**

begin

**** 曲線の一部を線分で近似

$x0 := a + i * h$; $x1 := a + (i+1) * h$;

$y0 = f(x0)$; $y1 = f(x1)$;

**** $y=d$ に射影

$xR0 := \phi_R(x0, y0)$; $xR1 := \phi_R(x1, y1)$;

$xL0 := \phi_L(x0, y0)$; $xL1 := \phi_L(x1, y1)$;

if (これまで描いた長方形と重ならない)

then

begin

描く色を決める（例えば i の偶奇により青、白等）；

横 ($xR0, d$) - ($xR1, d$) の縦長の長方形を描く；

横 ($xL0, d$) - ($xL1, d$) の縦長の長方形を描く；

end

end

end

これにより長方形群を描いた例を付録2に示す。

実際に、この曲面の立体錯視像がおおよそ得ることがわかる。さらに曲面が複雑になると、交差法での融合がなかなかうまくいかない例もでてくる。どのような曲線であれば、錯視像として得られるのか、また交差法の融合が容易にできるのか等の条件を調べるのは今後の課題として残されている。

5. まとめと今後の課題

異なった長方形群の融合により得られる立体錯視像を計算するシミュレーションプログラムを作成し、心理物理学の実験は未実施ではあるが、おおよそ認識できる立体視像を計算できるシミュレータが作成できた。

逆問題として、曲面（今回は曲線の柱）を与えて、それを異なる長方形の融合の立体錯視像として得られるような刺激画面を構成する方法について考察した。しかし、単純な曲線でも、その一部分しか立体視像としては得られなかった。

今後の課題として、次のことがあげられる。

- (1) このシミュレータの正しさを、心理物理学の実験により評価すること
- (2) 逆問題を解くプログラムを開発すること
- (3) 逆問題をより一般的な曲線に拡張すること

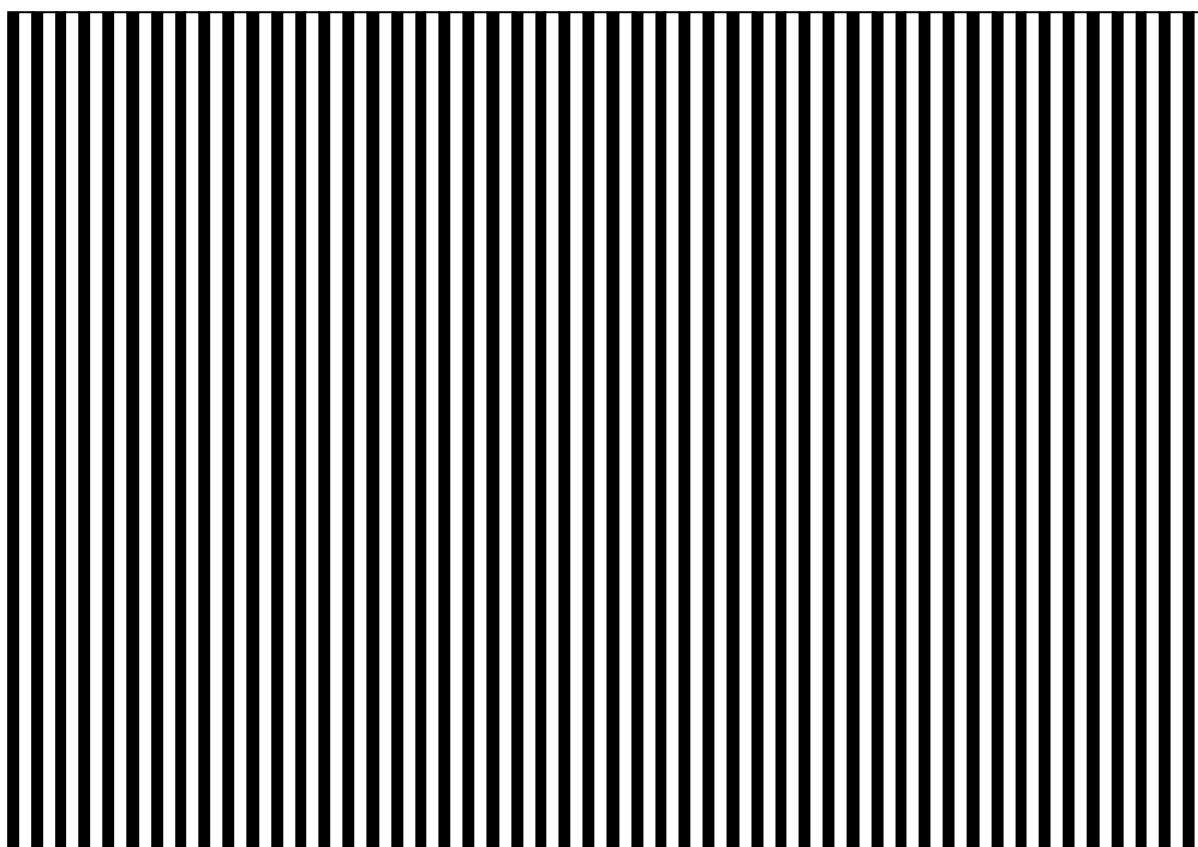
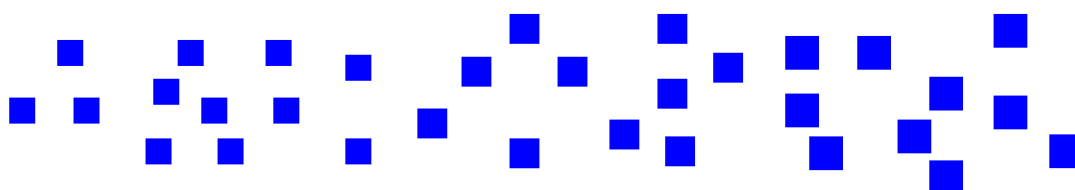
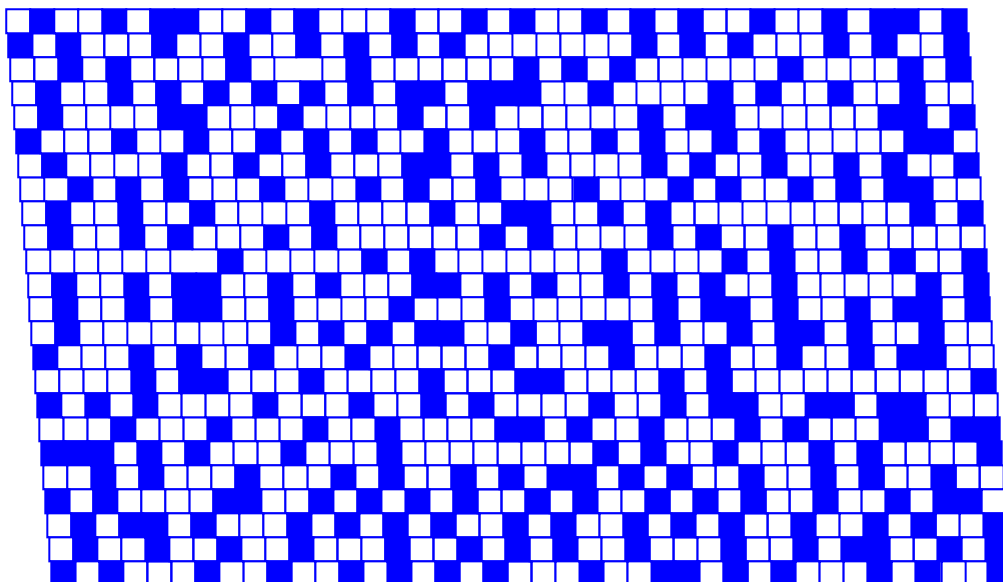
参考文献

- [1] 新井 仁之, (2016 年) <錯視>だまされる脳, ミネルヴァ書房, pp20-21
- [2] 内川恵二, 塩入 論編, (2007 年) 視覚Ⅱ, 朝倉書店, p110
- [3] 大塩智規, 大槻正伸, 小泉康一, (2018年) 縦格子を通してドット平面を両眼視したときに発生する立体錯視現象の研究, 日本認知科学会第35回大会発表論文集pp. 455-460
- [4] 大槻 正伸, 白木 大翔, 鈴木 直哉, 久野 裕哉, (2015年) 縦格子とドット平面による立体錯視現象の研究—立体錯視像の実測データと脳内計算モデルとの誤差計量方法—日本認知科学会 第32回大会発表論文集pp. 419-425
- [5] 下条 信輔, (1995 年), 視覚の冒険 産業図書, pp. 1-59
- [6] 杉原 厚吉, (2006年), 立体イリュージョンの数理, 共立出版, pp135-147
- [7] 田崎 京二他編, (1979 年) “視覚情報処理” 朝倉書店, pp.296-343

付録1 (縦格子による立体錯視現象を誘起する刺激)

異なる長方形の融合が行われていると考えられるが、錯視像に各ドット（小正方形）の融合像に明確な傾きは感じられない

下記縦格子を OHP シート等にコピーし、ドット平面から 10~20[mm]程度離して縦格子面を配置し、50~100[cm]程度離れた位置から縦格子面を通してドット平面を自然に両眼視する。



付録2 (異なる長方形群の融合により曲線を立立体錯視像として得られる刺激)

与える曲線は下図の赤い線で示してある (目標とする錯視像はこの赤色曲線の柱).
 実際に交差法で融合すると, 曲線の一部が (やや不明確にはあるが) 得られる.

