

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—

Research on the Solid Illusion by Vertical Gratings and a Dots Plane --A Method for Measuring the Error of a Measured Solid Illusion Image Data and a Calculation Model for the Human Brain--

大槻 正伸[†], 臼木 大翔[†], 鈴木 直哉[†], 久野 裕哉[†]
Masanobu Ohtsuki, Taito Usuki, Naoya Suzuki, Yuya Hisano

[†]福島工業高等専門学校

National Institute of Technology, Fukushima College
ohtsuki@fukushima-nct.ac.jp

Abstract

When we see a controlled dots plane through a vertical gratings plane, with both eyes, we can recognize some solid stripes which does not really exist. It is a kind of a solid illusion.

As we vary the distance h , the distance from the vertical gratings to the dots plane, we can recognize the solid stripes at some distances, and we cannot recognize it at some distances. This phenomenon is repeated periodically, as h increases.

We measured the distance h 's when this solid illusion occurs, and when it does not occur.

Next we construct a computer program which simulates this solid illusion, with the calculation model of "the theory of unifying edge points".

So far we do not have the method for measuring the goodness of calculation models.

In this paper we propose the way how to measure the distance(error) between a calculation model and a measured data.

Keywords — Solid Illusion, Vertical Grating

1. はじめに

「縦格子とドット平面による立体錯視現象」^{[1]–[4]}とは次の現象である。まず「ドット平面 $PL(R, c)$ 」とは、一辺 R の正方形（ドット）を、1行に対して次の行では、開始位置を c だけずらして隙間なく配置したものである（図1）。正方形の色はランダムにつけてもよいし、青と白というように2色を50%程度ずつランダムに染めてもよい（付録参照）。「縦格子面 $Gr(m_1, m_2)$ 」とは幅 m_1 の黒色の帯を平面（透明な OHP シート等）に縦に m_2 の間隔

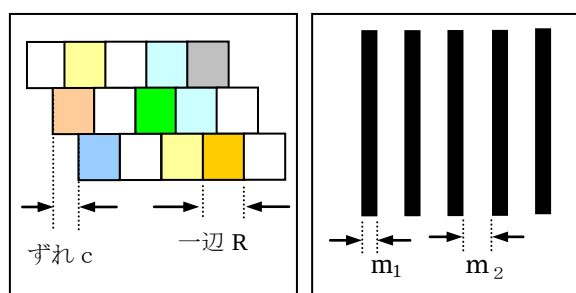


図1 ドット平面 $PL(R, c)$ 図2 縦格子 $Gr(m_1, m_2)$

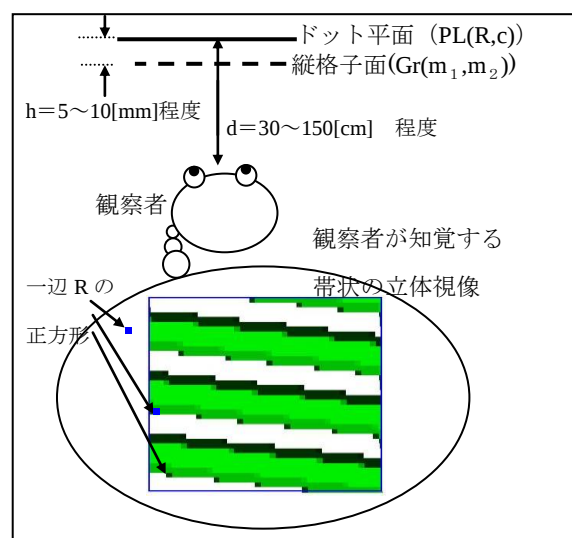


図3 ドット平面と垂直縦格子の重ね合わせによる立体錯視現象（実験の様子を上から見た図）

で規則的に配置したものである（図2）。

$R=0.3\sim0.5[\text{cm}]$, $c=0.05[\text{cm}]$ 程度とし, $PL(R, c)$ を立てそれに平行に $Gr(m_1, m_2)$ (m_1, m_2 は $0.1\sim0.3\text{cm}$ 程度)を h だけ離して配置し, これを通して

$PL(R,c)$ を距離 d (数十センチ～1.5 メートル程度) だけ離れた位置から両眼視すると, ある条件下で物理的に存在しない帯状の立体が明瞭に知覚される (図 3, 付録参照). 特に $R=m_1+m_2$ の条件で明瞭に帯状立体が知覚される.

さらに $R=m_1+m_2+\alpha$ (α は 0.05[cm]程度) とし, d (ドット平面-視点間の距離) は固定して, h (ドット平面-縦格子面間の距離) を変化させると次のような現象が生起する (図 4).

ある h で帯状立体が知覚され (図 4(1)), h を大きくしていくと知覚されなくなり (図 4(2)), さらに h を大きくすると知覚され (図 4(3)), ... と帯状立体が, 周期的に, 知覚されたりされなくなったりする^[4]. この際, 帯状立体は h が増加するにつれ最初は右上がりのものから, だんだん右下がりのものへと変化する.

さて, これらの錯視現象は, 単眼視では生起しないこと, 両眼視しても錯視現象が生起しない人が少数ながらいることも確認されている.

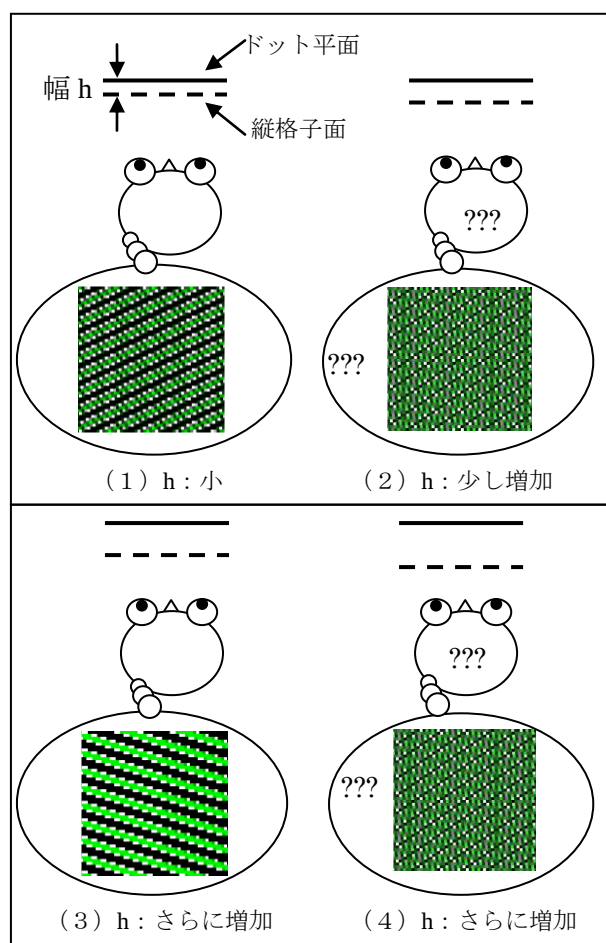


図 4 ドット平面-縦格子間距離 h を変化させたときの様子

そうすると, この錯視現象が生起する際には, 左網膜像と右網膜像の情報をもとに, 脳内で何らかの計算が行われていることになる.

文献[3],[4]では, 本論文 2 節で述べる, 脳内計算モデルをもとに, $R, m_1, m_2, \alpha, d, h$ 等のパラメータを入力し, 錯視像を表示するシミュレーションプログラムを作成し, その結果と実測結果の比較を行っている. 特に文献[4]では, h を変化させていったとき, 錯視像が最もはっきり見えた複数の h の値を, シミュレーション結果と実測値で比較している.

ただ, このような比較では, 計算モデルと人間の脳内計算 (実測値) とでは, 「最もよく錯視像が得られる h の値の平均誤差の程度」「 h が小さいところでの誤差の程度」といったたいの傾向がつかめるのみであった.

本論文の目的は, h の変化による錯視像の変化をより詳しく見て, 「脳内計算モデルがどの程度いいのか」, あるいは「人間 A と人間 B では, どの程度『見え方』に差があるのか」等を定量的に計量する手法を提案し, この立体錯視現象における計算モデル評価等を行うための手法の基礎づくりをすることである.

今回は, ここでの提案をもとに, 第 2 節の計算モデルと被験者 1 名との差の評価を行ったのみであるが, 今後脳内計算モデルを改良した場合のモデルの良さ等を計量するための理論的基礎となると考えられる.

2. 本現象の推定されるメカニズム (端点融合モデル)

この現象の発生メカニズムはおおよそ以下のよう予想される^{[4]-[6]}. まず, 図 5 では (a) (b) とも縦格子によりドットが遮蔽され, 左眼では A, 右眼では B の像が得られている. 実際に観察者が得る像 A, B とも, もとのドット (正方形) の一部が欠けた不完全な長方形となる. (a) では A, B が共通の 2 本の縦格子にはさまれており, (b) では A, B が, ある縦格子の左右両側にある. 従来の研究で, (a) の場合は, ドットは実際よりも手前に, (b)

では奥に知覚されることが確認されている^[2]。脳はこれらの不完全な情報から、ドット位置を推定計算することになるが今は(a)の場合について考える。

得られている 2 つのドット像は同一のドットで、左端点が同一であると仮定すると、図 4(a)のように、知覚された左端点に両眼から引かれた 2 つの線の交点 P にドットがなければ矛盾するから、これがドットの位置と推定され知覚される。このような計算、推定を「(左) 端点融合」とよぶ。ドット平面では、各ドットは様々なパターンに遮蔽され、実際のものではない距離が端点融合によって知覚される。実際よりも近くに知覚されるドット集団があり、それがある図形（例えば帯状図形）になっていると我々はその図形を認識する。

本現象のメカニズムは、以上のように予想されるが、脳内で実際に端点融合による距離計算が行われているか、その他の計算が行われているか等については明らかにされていない。

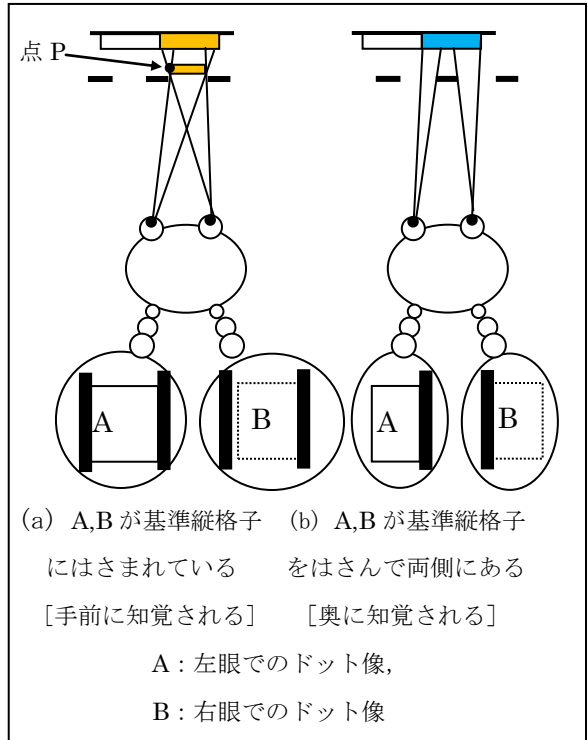


図 5 遮蔽パターンと認知距離

3. 距離空間の導入

まず図 4 に示す h の変化に対する錯視像の変化に着目する。この現象は、 h を大きくしていくと突然帯状立体が明瞭に知覚されるのではなく、

実際は「ある h_1 で見え始め」「ある h_2 で最も明瞭に見え」「だんだん明瞭でなくなりある h_3 で全く見えなくなる」ということが繰り返される。この (h_1, h_2, h_3) 等をもとに、以下でデータ間の距離を導入する。そしてこの距離が数学的に定義される疑似距離空間を構成することが示され、これにより計測データと脳内計算モデルとの誤差等を計量するための数学的根拠が与えられる。

定義 1 (データ)

データとは $D = \{ (h_{11}, h_{12}, h_{13}, \theta_1, m_1), (h_{21}, h_{22}, h_{23}, \theta_2, m_2), \dots, (h_{n1}, h_{n2}, h_{n3}, \theta_n, m_n) \}$ の実数 5 組の有限個の集合とする(表 1, 表 2)。
ここで h_{k1}, h_{k2}, h_{k3} はそれぞれ「帯状立体の見え始めの h 」, 「最も明瞭に見える h 」, 「見え終わりの h 」であり、 $h_{11} \leq h_{12} \leq h_{13} \leq h_{21} \leq h_{22} \leq h_{23} \leq \dots \leq h_{n3}$ とする (ただしデータが n 個で終了した場合は、この $h_{11} \leq h_{12} \leq h_{13} \leq \dots$ の大小関係は崩れるがそれには拘泥せずに、 $k > n$ で $(h_{k1}, h_{k2}, h_{k3}, \theta_k, m_k) = (0, 0, 0, 0, 0)$ とする)。表 1 に被験者 I の、2 回計測したデータを示す (計測方法は[4]参照)。

表 1 被験者 I の計測データ (下段 () は 2 回目)

k	h_{k1} [cm]	h_{k2} [cm]	h_{k3} [cm]	θ_k [度]	m_k [本]
1	1.2 (1.4)	2.4 (2.4)	3.0 (2.5)	60 (62)	15 (15)
2	5.8 (5.9)	6.2 (6.3)	9.0 (6.3)	56 (58)	13 (13)
3	10.7 (10.7)	11.0 (11.5)	13.5 (13.0)	44 (44)	10 (10)
4	15.2 (15.3)	15.9 (16.3)	18.5 (17.9)	27 (26)	7 (7)
5	20.4 (20.1)	20.5 (20.9)	24.0 (22.5)	0 (0)	5 (5)
6	25.0 (24.5)	25.6 (25.1)	27.5 (25.6)	-27 (-27)	7 (7)
7	30.0 (28.5)	31.0 (29.4)	34.5 (31.0)	-46 (-40)	10 (10)
8	36.0 (34.0)	36.6 (35.3)	40.0 (36.0)	-56 (-56)	13 (13)

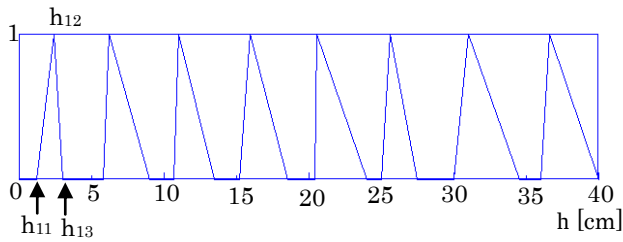


図6 被験者 I (1 回目) の計測データ (帯状立体の見え方と h の関係 (縦軸を, 明瞭に見える=1, 全く見えない=0 とし, 途中の明瞭さを直線近似した))

また, データを図 6 のように表現したとき, (h_{k1}, h_{k2}, h_{k3}) のつくる三角形 (点 $(h_{k1}, 0)$, 点 $(h_{k2}, 1)$, 点 $(h_{k3}, 0)$ を結ぶ三角形) を「 k 番目の三角形」と呼ぶことにする.

そして, θ_k は k 番目の三角形の最も明瞭に見える $h=h_{k2}$ のときの帯状立体錯視像の角度, m_k は帯状立体錯視像の本数とする

(例えば, 図 4(3) の場合 $\theta_k = -20$ 度, $m_k = 10$).

定義 2 (距離 1 dist1 (データ 1, データ 2))

まず, データ D を図 5 のようにグラフ化したとき, D のつくる n 個の三角形の和集合を $T(D)$ とする. D_1, D_2 という 2 つのデータが与えられたとき, D_1, D_2 間距離 dist1 を次で定義する.

$$\text{dist1}(D_1, D_2) = S(T(D_1) \triangle T(D_2))$$

ここで, S は面積, $\triangle$ は対象差を意味する.

定義 3 (距離 2 dist2 (データ 1, データ 2))

$$D_1 = \{(h_{11}, h_{12}, h_{13}, \theta_1, m_1), \dots, (h_{n1}, h_{n2}, h_{n3}, \theta_n, m_n)\}$$

$$D_2 = \{(h'_{11}, h'_{12}, h'_{13}, \theta'_1, m'_1), \dots, (h'_{n1}, h'_{n2}, h'_{n3}, \theta'_n, m'_n)\}$$

として, データ D_1 の $\{(\alpha h_{12}, \beta \theta_1, \gamma m_1), \dots, (\alpha h_{n2}, \beta \theta_n, \gamma m_n)\}$

という n 個の 3 次元空間の点を $3n$ 次元空間の点とみなし, データ D_2 についても同様とし, D_1, D_2 に対する $3n$ 次元の 2 点間のユークリッド距離で距離 dist2 を定義する. すなわち,

$$\text{dist2}(D_1, D_2) =$$

$$\left\{ \sum_{k=1}^n (\alpha h_k - \alpha h'_k)^2 + (\beta \theta_k - \beta \theta'_k)^2 + (\gamma m_k - \gamma m'_k)^2 \right\}^{1/2}$$

ここで α, β, γ は, $h[\text{cm}]$, $\theta[\text{度}]$, $m[\text{本}]$ という異なる単位に対して定義される距離を妥当なものとするためのスケール変換定数 (正の実数) である (今回は未確定のままとしておく).

性質 1 <データの集合, dist1 > と

<データの集合, dist2 >

<データの集合, $p \text{ dist1} + q \text{ dist2}$ > は疑似距離空間となる (ここで p, q は正の定数).

(証明) $i=1, 2$ として次の事実が確かめられる.

(1) $\text{disti}(D_1, D_2) \geq 0$ である.

そして, $D_1 = D_2 \Rightarrow \text{disti}(D_1, D_2) = 0$

(逆は必ずしも成り立たない)

(2) $\text{disti}(D_1, D_2) = \text{disti}(D_2, D_1)$

(3) $\text{disti}(D_1, D_2) + \text{disti}(D_2, D_3) \geq \text{disti}(D_1, D_3)$ □

なお, データを $D = \{(h_{11}, h_{12}, h_{13}), (h_{21}, h_{22}, h_{23}), \dots,$

$(h_{n1}, h_{n2}, h_{n3})\}$ という形に限定すると, <データ

の集合, dist1 > は距離空間なる. dist2 についても同様である.

性質 2 計算モデル (シミュレーションプログラム)

に被験者 A のパラメータを入力して計算して出た結果のデータを D_1 とし, 被験者 A の実測データ (例えば表 1) を D_2 とすると, 計算モデルが正確であれば, $\text{dist1}(D_1, D_2)$, $\text{dist2}(D_1, D_2)$ は 0 に近づく. ただし実際には測定誤差のため 0 にはならないと考えられる.

実際の計測値と計算モデルでの $T(D_1)$ と $T(D_2)$ は図 7 のようになる. 図 7 は, $R=0.329[\text{cm}]$, $c=0.0298[\text{cm}]$, $m_1=0.119[\text{cm}]$, $m_2=0.149[\text{cm}]$, $d=120.0[\text{cm}]$, 目の幅 (左右の瞳の中心の幅) $=7.0[\text{cm}]$ としての, 測定結果 (h_1, h_2, h_3) 等, および第 2 節の端点融合の脳内計算モデルをもとにしたシミュレーション結果から判断した (h'_1, h'_2, h'_3) で等ある (表 2). この場合 $\text{dist1}(D_1, D_2)=10.82$ であった. また, 被験者 I の 2 回目の測定データを D_3 とし (表 1 の () 内), 被験者のデータ同士の距離も計測した. 実際に被験者 I の 2 回の測定のデータの距離は 8.7 程度であった (図 7).

表 2 被験者 I をシミュレートした結果

k	h _{k1} [cm]	h _{k2} [cm]	h _{k3} [cm]	θ _k [度]	m _k [本]
1	3.8	4.1	4.4	65	16
2	8.3	8.7	9.0	56	14
3	12.1	13.2	13.7	45	10
4	16.3	17.4	18.3	-28	7
5	20.8	22.2	22.9	0	4
6	25.6	26.6	27.4	-25	6
7	30.8	31.6	32.1	-45	10
8	35.6	36.2	36.6	-58	13

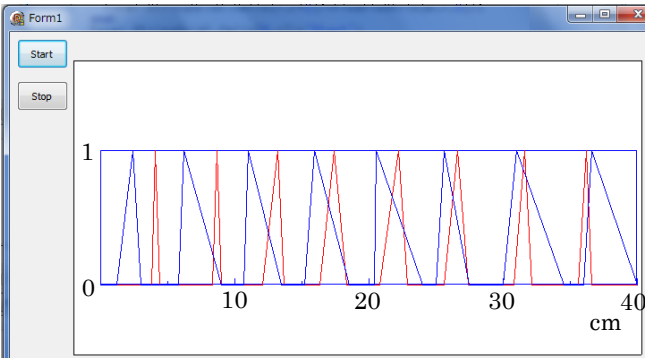


図 7 測定値のデータ D₁ (青) とシミュレーション結果のデータ D₂ (赤)

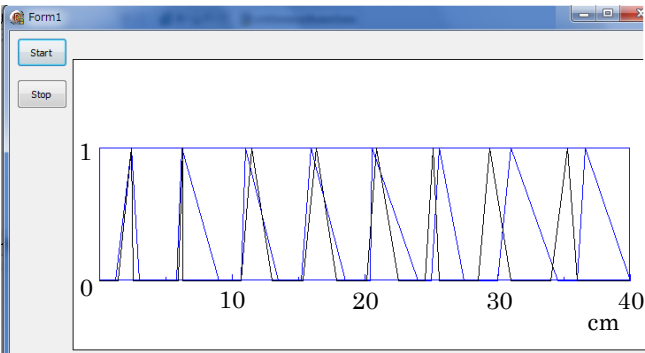


図 8 被験者 I の 2 回の測定値のデータ D₁ (青) と、2 回目の測定値データ D₃ (黒)

以上により、計測データ、脳内計算モデル間の距離が計量できるようになった。

なお、 $\text{dist2}((D_1, D_2)) = \{20.6\alpha + 36\beta + 4\gamma\}^{1/2}$

$\text{dist2}((D_1, D_{23})) = \{5.1\alpha + 45\beta + 0\gamma\}^{1/2}$

であった(スケール変換定数 α, β, γ は未定のままとしてある)。これらを見ると、被験者 I の 2 回の測定データには比較的誤差が少ないが、測定データとシミュレーションデータでは誤差が大きく、

脳内計算モデルには改良の余地が残されていることが示唆される。

4. まとめと今後の課題

以上で縦格子とドット平面による立体錯視現象における、データ間の距離を計測するための基礎が確立された。

この距離の導入により、次のことができるようになった。

(1) 計測データ間のずれや、測定データと脳内モデルとのずれが計量できるようになった。

ただし、未確定の係数 α, β, γ の妥当な値は今後の実験により確定しなくてはならない。

(2) 一部分(例えば「 $h < 15[\text{cm}]$ 以下の領域」, 「最初 5 個三角形」での距離)等も計量できるようになる。

今回は、被験者 I の 2 回測定 of データ、端点融合モデルによるコンピュータシミュレーション結果(全体)についてその距離を求めた。

さて、図 7 に示すように、前回の研究^[4]では「 h が小さいところでは(明瞭に見えるピークの位置で)計測結果とシミュレーション結果の誤差は大きいが h が大きいところでは誤差は小さくなる傾向にある」と結論づけられたが、今回導入した距離により、「ピークのみに着目すればそうだが、 h が小さいところも、 h が大きいところでも、($h = 10[\text{cm}] \sim 30[\text{cm}]$ の中間領域に比べ)計測結果とシミュレーション結果では、やはり誤差がやや大きくなる」ことが分かる。

この結果を見ると、人間は端点融合の計算のみでなく、端点融合計算の後、まわりのドット(小正方形)との比較等何らかの補正処理もしていることが示唆される。

今後の課題として、より正確な補正を含めた計算モデルの構築があげられる。そのためのモデルのよさの計量に今回導入した距離が使えることになる。

参考文献

- [1]大槻, 中野(2002), “ランダムドット平面と垂直
グレーティングの重ね合わせによる帯状立体面
の出現(2)”, 日本認知科学会第19回大会発表論
文集 pp200-201,
- [2] 大槻, 會田, 中野(2004) “ランダムドット平面
と縦格子による立体錯視におけるドットの遮蔽
パターン解析”, 日本認知科学会第21回大会発
表論文集 pp86-87
- [3] 大槻, 大野, 保科(2010), “縦格子とドット平
面による立体錯視現象の脳内距離計算に関する
基礎研究—2つの異なる長方形の同一視と認知
距離の測定—”, 日本認知科学会 第27回大会発
表論文集 pp571-574
- [4] 大槻, 大越(2014), “縦格子とドット平面によ
る立体錯視現象の研究——縦格子とドット平面
間距離の変化と錯視像の変化の関係——” 日本
認知科学会 第31回大会発表論文集 pp380-386
- [5] 下條 信輔(1995): 視覚の冒険,産業図書
pp15-59
- [6] 杉原 厚吉(2006): 立体イリュージョンの数
理, 共立出版

付録（縦格子による立体錯視現象を誘起する刺激）

下記縦格子を OHP シート等にコピーし，ドット平面から 1～2[cm]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と帯状立体が数本知覚される．縦格子面を変化させると，帯状立体が知覚されたり，知覚されなかったりする

