視覚の輝度知覚に対応した錯視シミュレーション

岡崎 秀俊^{a*} 河合 宏紀^a

Illusion Simulation Corresponding to Brightness Perception of Vision

Hidetoshi Okazaki^{a,*}, Hironori Kawai^a

(Received September 16, 2016; revised November 2, 2016; accepted November 24, 2016)

Abstract

Human visual characteristics have been elucidated in psychology and medicine. However, many signal processes in the brain have not been elucidated. To elucidate the cause of the illusion, it is expected to lead to elucidation of detailed mechanism of the visual system. In this paper, we propose the computation model of illusion of Hellman grid image. The Illusion that dark spot appears on the intersection of the white line is simulated by wavelet transform. Also, we reproduced the phenomenon that the dark spot disappears in attention by the computation model based on spatial frequency. Additionally, the experiment was conducted for showing the relationship between illusion and brightness perception, and the validity of the proposed method was confirmed.

キーワード：錯視, シミュレーション, 輝度知覚, ヘルマン格子, ウェーブレット変換

Keywords: Illusion, Simulation, Brightness Perception, Hellman grid, Wavelet Transform,

1. はじめに

人間の視覚特性については、眼球の運動や脳の視覚野の構造などが、主に医学や心理学の分野で解明されてきた。しかしながら、脳内の視覚信号の処理過程の多くは、未だ解明されていない。視覚特性の一つである錯視は視覚の欠陥ではなく、ものをよく見るために形成された視覚系の副産物である。したがって、錯視の原因を解明すれば、視覚系の詳細なメカニズムの解明につながるものが期待される。

錯視の一例である Fig.1 のヘルマン格子では、複数の白線の交差上にダークスポットと呼ばれる錯視が現れ、注意点ではダークスポットが現れないといった特徴がある。しかしながら、その原因は明らかにされていない⁽¹⁾。従来、ヘルマン格子の錯視は、網膜上の受容体の側抑制の作用によって説明されてきた⁽²⁾。この説では、強いヘルマン格子錯視が見られるようにするための白線の幅は、任意の網膜偏角で受容野中心の平均サイズに一致する必

Fig.1. Hellmann grid

要があるとされる⁽²⁾。しかしながら、実際には錯視が観測できる距離には幅があり、空間周波数には帯域があると考えられ、ヘルマン格子の錯視と空間周波数との関係が Spillmann によって指摘されている⁽¹⁾。

一方、視覚特性に基づく計算機モデルを用いてシミュレーションを行い、計算結果と視覚特性との整合性を検証することにより、視覚の情報処理システムが研究されている⁽³⁾。ただし、ヘルマン格子の錯視と空間周波数との関係を示したシミュレーション結果は報告されていない。そこで、本研究ではウェーブレット変換を用いて、視覚特性に対応した多重スケールの周波数成分の制御により、ヘルマン格子のダークスポットをシミュレートす

* Corresponding author. E-mail: okaz@oshima-k.ac.jp

a 大島商船高等専門学校

〒742-2193 山口県大島郡周防大島町大字小松 1091-1
National Institute of Technology, Oshima College
1091-1, Komatsu, Oaza, Suo-Oshima-cho, Oshima-gun,
Yamaguchi, Japan 742-2193

る。また、注意点ではダークスポットが弱くなる現象も再現する。さらに、シミュレーション結果の妥当性を確認するために被験者実験を行い、錯視と輝度知覚の関係からシミュレーション結果の妥当性を示す。

以降、2章で視覚の特性について、3章でシミュレーションに用いたウェーブレット変換について説明する。そして4章で提案する計算モデルによる実験結果を5章で示す。さらに6章で被験者実験によりシミュレーションの妥当性を確認して、最後に7章で結ぶ。

2. 視覚

人間の視覚では Fig.2 に示す輝度の境界にマッハバンド⁽⁴⁾が現れるため、輝度差が強調されて見える。この視覚特性は神経細胞の側抑制によるものとされている⁽⁵⁾。

側抑制は視覚神経細胞の受容野の働きによるものである。人間の視野は異なる反応を示す重なり合った2種類の受容野により構成されている。受容体には ON 型と OFF 型があり、ON 型の中心はプラスで周辺がマイナスで OFF 型は ON 型の逆である⁽⁶⁾。例えば、ON 型の受容野に光刺激が与えられた場合、中心細胞が興奮して、周辺細胞は中心細胞の興奮を抑制する。受容野に均一な光刺激が与えられたなら、重なり合った受容野が互いに側抑制を行うので出力は均一となる。しかし、周辺細胞への光刺激が全く無いか、または中心に比べ光刺激が極めて弱い場合は、周辺細胞による中心細胞の興奮への側抑制が弱くなる。そのため、中心と周辺の両方に光刺激がある場合に比べ、中心のみに光刺激がある場合は、中心細胞はより強く、周辺細胞はより弱く反応する。

受容野が画像の輝度境界上に位置する Fig.3 で示されるような場合、わずかな位置のずれにより中心細胞の反応は変化する。様々な大きさの受容野がランダムに配置されているため、輝度境界周辺での受容野の反応は様々である。このような受容野の特性により、画像の輝度が変化する境界においては、輝度の変化が、より強調されるため、マッハバンドが現れると考えられる。

Fig.2. Mach band in human visual system

Fig.3. Receptive fields on boundary line

また、受容野の密度は網膜の中心で高く周辺では低い。そのため中心視では周辺視に比べ、対象の細部が拡大されて見えると考えられる。

3. ウェーブレット変換

我々は、視覚が周波数選択性を持つ複数のチャネルを持っていると想定して、非直交ウェーブレット変換⁽⁷⁾による計算モデルを作成する。このウェーブレット変換を2次元に拡張して用いている。側抑制による高周波強調のシミュレーションでは、入力画像を、順ウェーブレット変換を用いて分解し、ウェーブレット変換の各スケール j の微分画像に係数 C_j を乗じ、逆ウェーブレット変換によってシミュレートされた画像を再構成する。

1次元の離散ウェーブレット変換は、信号とウェーブレット関数との内積から定義される。実際の計算においては、離散ウェーブレット変換は離散時間フィルタからなるフィルタバンク構造による計算される。入力信号 $f(n)$ はスケール 0 の解像度の信号として $S_0 f(n)$ と表す。スケール j の離散平滑化信号 $S_j f(n)$ は、スケール $j+1$ のウェーブレット変換 $W_{j+1} f(n)$ とスケール $j+1$ の離散平滑化信号へ分解される。

$$W_{j+1} f(n) = \sum_m S_j f(m) \cdot h(2^{j+1} m - n) \quad (1)$$

$$S_{j+1}f(n) = \sum_m S_j f(m) \cdot g(2^{j+1}m - n) \quad (2)$$

ここで、 g および h は、離散フィルタのインパルス応答を示す。これらは、ウェーブレット関数 $\psi(x)$ およびスケール関数 $\phi(x)$ と、式(3), (4)で示される関係を持つ。

$$\psi(x/2) = \sum_m h(m) \cdot \phi(x-m) \quad (3)$$

$$\phi(x/2) = \sum_m g(m) \cdot \phi(x-m) \quad (4)$$

さらに、 $W_j f(n)$ と $S_{j+1} f(n)$ からの再構成信号 $S_j f(n)$ は

$$S_j f(n) = \sum_m W_j f(m) \cdot k(2^{j-1}m - n) + \sum_m S_{j+1} f(m) \cdot g^*(2^{j-1}m - n) \quad (5)$$

で表される。ここで、 $k(n)$ は合成ウェーブレット関数を導出するフィルタ係数であり、 $g^*(n)$ は $g(-n)$ を示す。 $g(n)$, $k(n)$, $h(n)$ がそれぞれ z 変換された $G(z)$, $K(z)$, $H(z)$ が

$$G(z^{-1}) \cdot G^*(z^{-1}) + H(z^{-1}) \cdot K(z^{-1}) = 1 \quad (6)$$

を満足することにより完全再構成を実現する。以上より、入力信号 $S_0 f(n)$ は、スケール 1 からスケール J までのウェーブレット変換とスケール J の離散平滑化信号により、

$$\{ \{ W_j f(n) \}_{1 \leq j \leq J}, S_J f(n) \} \quad (7)$$

と表現される。

4. 計算モデル

本研究では、ウェーブレット変換によるヘルマン格子の錯視現象の計算モデルを提案している。ヘルマン格子は、黒地に白い格子を持ち、白線の交差部にダークスポットと呼ばれる錯視が現れる。我々はこの理由を、高い輝度コントラストを持つヘルマン格子に側抑制が強く影響するためであると推察している。これは、白と黒の輝度境界では、マッハバンドにより白線の輝度が上昇している様に見える⁽⁶⁾。しかし、白線の交差部では、輝度境界からの距離が遠いためにマッハバンドの効果が現れず、周囲より暗く見えるという仮説に基づいている。

ヘルマン格子では、白と黒の境界だけが強調されて見えるのではなく、交差部を除く白線全体が均一な明るさに見える。単一周波数の微分操作では、幅を持つ白線部全体の輝度を均一にする計算モデルの作成は困難である。そこで、側抑制によるマッハバンド現象の計算モデルとして、すべての座標について多重スケールの微分操作が可能な非直交のウェーブレット変換を用いる。(8)式では、各スケールの水平方向ウェーブレット係数 $WH_j f(m, n)$ と垂直ウェーブレット係数 $WV_j f(m, n)$ に係数 C_j を乗算の後、逆変換することにより、マッハバンドを再現する。

$$W_j f(m, n) = C_j \cdot W_j f(m, n) \quad (8)$$

さらに、提案する方法では、注意によって錯視が弱く

なる現象も再現する。我々は、視覚の中心部では拡大効果によって空間周波数が周辺より低くなるため、注意によってダークスポット現象が弱くなると推測している。そこで、提案法による実験では、画像の中心を注意すると仮定して、画像の中心部分のウェーブレット変換に乗ずる係数の周波数を低くして、シミュレーション画像を再構成する。具体的には、視野の周辺部では高周波のスケール $j=1, 2, 3$ のウェーブレット変換に係数 C_j を乗じて強調を行う。一方、視野の中心部では強調が低周波側に作用するように、スケール $j=2, 3, 4$ のウェーブレット変換に係数 C_j を乗じて強調を行う。

5. シミュレーション

実験に用いた入力画像を Fig.4 に示す。画像データは $256 \times 256 \times 8\text{bit}$ で構成される。輝度は 0 から 255 までの値である。また白線の幅は 11 画素である。本実験では、ウェーブレット変換の微分画像に係数を掛けた後の逆変換により出力画像の輝度レンジが広がることを想定して、入力画像の輝度値を黒は 50、白は 200 とした。錯視の計算モデルを作成するために、入力画像に 3 スケールのウェーブレット変換を行い、各スケール j の微分画像に係数 $C_j=1.5$ を乗じた。ウェーブレット変換の各スケールの強調係数を Table 1 に示す。

Fig.4. Input image used in the experiment

画像の中心 20×20 画素では拡大効果によって強調成分の周波数が低くなるという想定に基づき、周辺より低周波となるスケール $j=2,3,4$ の微分画像に係数 $C_j=1.5$ を乗じた。逆変換された出力画像を Fig.5(a)に示す。また、出力画像の白線の輝度断面を Fig.5(b)に示す。

出力画像では、白線の輝度は 200 から 224 まで上昇した。しかし、白線の交差部の輝度は 208 で、輝度上昇は他の部分より小さく、錯視によるダークスポットが近似された。交差部は他よりも輝度境界から遠いので、微分画像に係数を乗じた効果が弱くなるためである。

Table 1 Enhancement coefficients C_j

Scale j	1	2	3	4
Central	1.0	1.5	1.5	1.5
Periphery	1.5	1.5	1.5	1.0

(a) Output image

(b) Intensity value cross section along line segment

Fig.5. Output image by proposed method

従来の計算モデル⁽³⁾では、交差部の輝度が下がることによりダークスポットが現れるとしている。一方、我々の計算シミュレーション結果によると、ダークスポットが現れる理由は、他よりも交差部での輝度上昇が小さいためであると考えられる。

また、中央の交差部では、注意による拡大効果のモデルとして、ウェーブレット変換の低周波成分を強調したので、他の交差部よりも輝度が上昇して 214 となり、ダークスポットは他の交差部より弱くなっている。

6. 輝度知覚

シミュレーションにより、白線の輝度が上昇するが、交差部の輝度上昇が小さいため、ダークスポットが見えるという可能性を示した。このシミュレーションが妥当であれば、ウェバー・フェヒナー則により、被験者が画像を見る環境の照度を高くすれば、錯視によるダークスポットのわずかな明暗差の知覚が困難になる事が予測される。

刺激光の輝度 I (刺激強度) と知覚される光の強さ R (知覚量) の関係はウェバー・フェヒナー則により次式で表される。

$$R = k \cdot \log I + C \quad (9)$$

つまり、Fig.6 に示すウェバー・フェヒナー則が成立するような刺激光と順応光の条件下では、刺激光によって生じる感覚量 (知覚量) は刺激光の輝度の対数値に比例する。ヘルマン格子のダークスポットが、交差部に比べて周囲の輝度が上昇する事によるというシミュレーションが正しければ、被験者が画像を見る環境の照度が高くなれば、ウェバー・フェヒナー則により、ダークスポットのわずかな明暗差の錯視が知覚しづらくなることが予測される⁽⁸⁾。

実験では 20 人の被験者に、紙に印刷した Fig.1 のヘルマン格子画像を、360~20,000lux までの 7 段階の環境照度で提示して、被験者が見えたダークスポットが Fig.7 のサンプル画像のどれに最も近く見えるかを回答してもらった。使用した照度計は C.I.E 規格に準拠しており、その波長による感度分布は人間の可視光に一致している。

Fig.6. Weber-Fechner law

サンプル画像は提案法のウェーブレット変換の強調係数を 1.2~2.0 まで変化させて 5 種類作成している。強調係数が 1.2~1.6 ではダークスポットが良く見えるが、1.8 以上では交差部も白くなりダークスポットは見えづらくなっている。実験の結果を Table 2 に示す。大半の被験者が、照度が上がるにつれダークスポットが見えづらくなり、強調係数の高いサンプル画像に見え方が近似していると回答した。この実験により、周囲の明るさが錯視の見え方に影響を及ぼすことが確認できた。

実験から、ヘルマン格子の錯視は周囲の照度の上昇の影響を受け、徐々に錯視が見えにくくなるという結果を得た。これまでのシミュレーションモデル⁽³⁾では、ヘルマン格子の交差部の輝度が大きく減少することでダークスポットが現れるとされていた。しかし、そのようにしてダークスポットが見えると仮定すれば、周囲の照度が上昇してもダークスポットの輝度が下がって見えているため、ダークスポットの見え方に影響を与えにくいと考えられる。一方、提案法によるシミュレーションでは白線部全体の輝度が上昇するため、周囲の照度が上昇した場合、ウェバー・フェヒナー則の影響を受け、ダークスポットの判別能力が低下して見えにくくなったと考えられる。以上より、ヘルマン格子のダークスポットは、白線の輝度が上昇して見えているが交差部の輝度上昇が小さいため周囲より暗く見えるという、提案法によるシミュレーションを裏付ける結果が得られた。

Fig.7. Illusion sample images

Table 2 Coefficient of illusion samples corresponding to the environmental illumination

Illumination (lux)		360	420	672	3500	5120	8630	20000
Subjects	a	1.2	1.2	1.2	1.6	1.6	1.8	2.0
	b	1.2	1.2	1.2	1.6	1.6	1.6	1.8
	c	1.4	1.4	1.4	1.6	1.6	1.8	1.8
	d	1.2	1.2	1.2	1.6	1.8	1.8	2.0
	e	1.4	1.4	1.4	1.4	1.6	1.6	2.0
	f	1.4	1.4	1.4	1.4	1.8	1.8	2.0
	g	1.2	1.2	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
	h	1.2	1.2	1.4	1.6	1.6	1.8	1.8
	i	1.2	1.2	1.6	1.6	1.6	1.8	1.8
	j	1.2	1.2	1.2	1.4	1.4	1.6	1.6
	k	1.2	1.2	1.4	1.6	1.6	1.6	1.8
	l	1.2	1.2	1.4	1.6	1.6	1.8	2.0
	m	1.2	1.2	1.4	1.6	1.6	1.8	2.0
	n	1.2	1.2	1.4	1.6	1.6	1.8	2.0
	o	1.4	1.4	1.4	1.4	1.6	2.0	2.0
	p	1.2	1.2	1.2	1.6	1.6	1.8	1.8
	q	1.2	1.2	1.4	1.4	1.6	1.8	1.8
	r	1.2	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.0
	s	1.2	1.2	1.4	1.4	1.4	1.6	1.6
	t	1.2	1.2	1.4	1.4	1.6	1.8	2.0

7. 結論

本論文では、ヘルマン格子錯視の計算機モデルを提案した。提案法では、視覚が周波数選択性を持つ複数のチャネルを持っていると想定して、非直交ウェーブレット変換を用いた。ヘルマン格子のダークスポット現象の原因は受容野の側抑制によるマッハバンドであると仮定して、ウェーブレット変換の微分成分に係数を乗じて逆変換を行う事によりダークスポット現象を再現する手法を提案した。人間の感覚と異なり、白線の輝度上昇に比べて交差部の輝度上昇が小さいため、ダークスポットが現れる可能性を示した。また、注意によって受容野に対する画像の周波数が低下して、ダークスポットが弱くなる現象を、ウェーブレット変換を用いた計算モデルにより再現した。さらに、シミュレーション結果の妥当性を確認するために、被験者実験を行い、錯視と輝度知覚の関係からシミュレーション結果の妥当性を確認した。

文 献

- (1) L. Spillmamm, The Hermann grid illusion : a tool for studying human perceptive field organization, Perception, 23, pp.691-708, 1994.
- (2) G. Baumgartner, Indirekte Größenbestimmung der rezeptiven Felder der Retina beim Menschen mittels der Hermannschen Gittertäuschung. Pflüges Archiv für die gesamte Physiologie, 272, pp.21-22, 1960.
- (3) H. Arai, A Nonlinear Model of Visual Information Processing Based on Discrete Maximal Overlap Wavelets,

Interdisciplinary Information Sciences, Vol.11, no.2, pp.177-190, 2005.

- (4) N. Bruno and W. Gerbino, Illusory figures based on local kinematics, Perception, 20, pp.259-274, 1991.
- (5) T. E. Parks, Illusory figures: A (mostly) atheoretical review, Psychological Bulletin, 95, pp.282-300, 1984.
- (6) T. N. Cornsweet, Visual perception. Academic Press. 86, pp.178, 4, 1970, New York.
- (7) S. Mallat and S. Zhong, Characterization of signals from multiscale edges, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, no.7, pp.710-732, 1992.
- (8) Robert Snowden, Peter Thompson, Tom Troscianko, Basic Vision An Introduction to Visual Perception, Oxford University Press, pp.32-35, 2012.

岡崎 秀俊

2003年3月東京農工大学大学院生物システム応用科学研究科博士後期課程修了, 博士(工学)。2005年4月大島商船高等専門学校電子機械工学科准教授, 現在に至る。画像処理と視覚情報処理の研究に従事。電子情報通信学会, 日本視覚学会会員。

河合 宏紀

2008年3月大阪市立大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。大阪電気通信大学客員研究員を経て, 2009年4月大島商船高等専門学校情報工学科助教。現在同准教授。視覚情報処理の研究に従事。電子情報通信学会会員。