V1顕著性仮説に基づく 消える錯視の消失効果と神経基盤

令和6年度 修士論文

横浜市立大学大学院

生命ナノシステム科学研究科

物質システム科学専攻

河野太陽

目次

1.	序論	5
	1.1 背景	.5
	1.2 消失効果に関する研究	.6
	1.3 研究目的	.8
2.	消える錯視を用いた知覚実験	9
	2.1 消える錯視	.9
	2.2 知覚実験の概要1	0
	2.3 縦縞と横縞の消える錯視の距離依存性測定1	2
3.	研究手法1	5
	3.1 一次視覚野(V1)1	5
	3.2 神経回路シミュレーション1	5
	3.3 V1 顕著性仮説(V1SH)	6
4.	V1 顕著性仮説に基づくモデル開発1	7
4.	V1 顕著性仮説に基づくモデル開発1 4.1 V1 モデルの概要	7
4.	V1 顕著性仮説に基づくモデル開発 1 4.1 V1 モデルの概要 1 4.2 モデルの詳細な説明と議論 1	7 7
4.	V1 顕著性仮説に基づくモデル開発 1 4.1 V1 モデルの概要 1 4.2 モデルの詳細な説明と議論 1 4.3 モデルの動作テスト 2	7 7 7
4 .	V1 顕著性仮説に基づくモデル開発 1 4.1 V1 モデルの概要 1 4.2 モデルの詳細な説明と議論 1 4.3 モデルの動作テスト 2 V1 モデルを用いた消える錯視のシミュレーション 2	.7 .7 .21
4.	V1 顕著性仮説に基づくモデル開発 1 4.1 V1 モデルの概要 1 4.2 モデルの詳細な説明と議論 1 4.3 モデルの動作テスト 2 V1 モデルを用いた消える錯視のシミュレーション 2 5.1 観察距離ごとの錯視観察時のシミュレーション 2	.7 .7 .1 21 22
4.	V1 顕著性仮説に基づくモデル開発	.7 .7 .7 .1 .2 .2 .2 .2 .2 .2
4. 5. 6.	V1 顕著性仮説に基づくモデル開発	.7 .7 .7 .1 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2
4. 5. 6. 7.	V1 顕著性仮説に基づくモデル開発	.7 .7 .1 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2
 4. 5. 6. 7. 8. 	V1 顕著性仮説に基づくモデル開発 1 4.1 V1 モデルの概要 1 4.2 モデルの詳細な説明と議論 1 4.3 モデルの動作テスト 2 V1 モデルを用いた消える錯視のシミュレーション 2 5.1 観察距離ごとの錯視観察時のシミュレーション 2 5.2 消える錯視の収縮率および刺激サイズの与える影響 2 考察と結論 3 謝辞 3	7 7 7 21 22 26 22 34 36

V1顕著性仮説に基づく 消える錯視の消失効果と神経基盤

氏名:河野太陽

主指導教員: ミケレットルジェロ 教授 副指導教員: 吉本和生 教授, 北幸海 准教授 V1顕著性仮説に基づく消える錯視の消失効果と神経基盤

Neural Basis and Disappearance Effect of Vanishing Illusions Based on the V1 Saliency Hypothesis

物質システム科学専攻 河野太陽 指導教員 ミケレットルジェロ

【重要語句】

消える錯視:任意画像を、ストライプ、ドット、波状パターンなどの規則的な繰り返しを持つ背 景画像に重ね合わせることで生成される。この錯視は、被写体が観察者の視野内で「消える」よ うに見える消失効果現象を引き起こす。

V1顕著性仮説:一次視覚野(V1)が視覚的注意を誘導するボトムアップ型の顕著性マップを構築す るという仮説。

顕著性マップ:視覚情報の中で特に目立つ部分を選択的に強調し、注意を引く役割を果たす脳内 の表現モデル。

神経回路シミュレーション:脳内の神経細胞やその相互作用をコンピュータ上で再現し,神経活動や情報処理を解析および理解するための手法。

〈研究背景と目的〉

錯視研究は、視覚情報処理の複雑なプロセスを理解するための重要なツールであり、知覚科 学、認知心理学、神経科学において学問的価値を持つ。本研究は、発生メカニズムが未解明の 「<u>消える錯視</u>」に焦点を当て、消失効果の発生機序を解明することで、視覚野(V1)における 視覚情報処理の理解を深めることを目的とする。消失効果は、高コントラストエッジが低コント ラスト要素を抑制し、認識を困難にする現象であり、隠された画像や足踏み錯視といった視覚現 象と関連している。Zenger-Landolt (2001) やWade (2017)の研究により、コントラストや空間 周波数の特性が効果に影響を与えることが示されている。また、エッジ間の角度が抑制の強度に 寄与し、方向選択性細胞の特性と一致することが示唆されている。本研究では、これらの要因を 検証し、消える錯視の消失効果における視覚的抑制メカニズムのさらなる解明を目指す。

〈方法〉

消える錯視の距離依存性については、十分な分析が行われていない。そのため、本研究では観 察距離の影響を定量的に評価する知覚実験を実施し、消失効果における距離依存性の詳細なデー タ解析を行った。また、高コントラスト部分と低コントラスト部分のエッジが形成する角度が、 錯視の発生において重要な要因となる可能性を検討した。視覚野(V1)には方向選択性細胞が 存在し、特定の角度や方向に敏感であることが知られている。この特性を踏まえ、V1が視覚的 注意を誘導する<u>顕著性マップ</u>を形成するという<u>V1顕著性仮説</u>に基づき、消える錯視に関連する V1内の神経細胞の活動変化を解析するモデルを開発した。このモデルを用いて、消える錯視観 察時におけるV1での顕著性処理の動態を詳細に検証した。 〈結果と考察〉

1) 消える錯視の距離依存性の測定

本研究では、18名の被験者を対象に、消える錯視の距離依存性を測定した。縦縞および横 縞パターンの錯視を50 cmおよび100 cmの距離で評価した結果、いずれの条件でも距離の増加 に伴い錯視の強さが減少する傾向が確認された。特に、縦縞パターンでは錯視の強さの減少 が顕著であり、近距離では視覚刺激を実際より濃く知覚する傾向が示された。一方、横縞パ ターンでは全体的な錯視の影響が縦縞パターンよりも小さく、錯視の変化も緩やかであっ た。統計分析の結果、縦縞条件において距離の増加が認識誤差の減少に寄与することが示唆 された。これらの結果は、消える錯視における視覚的適応および注意の分配が距離に依存す ることを示しており、近距離での錯視効果が特に強いことを示している。



図1. 縦縞と横縞の消える錯視の距離依存性の測定結果.

Condition	Mean	Standard	Min (Positive)	Max
	Positive Error	Deviation		(Positive)
		(Positive)		
Vertical 50 cm	0.0606	0.0379	0.01	0.16
Vertical 100 cm	0.0486	0.0401	0.01	0.14
Horizontal 50 cm	0.0391	0.0266	0.01	0.11
Horizontal 100 cm	0.0238	0.0116	0.01	0.05

表1. 消える錯視による正の認識誤差の統計情報

表2. 二群間T検定(観察距離50cm, 100cm 有意水準0.05)

Mask Image	p-value
Vertical stripe	0.031
Horizontal stripe	0.008

2) V1顕著性仮説に基づくV1モデルの開発



図2. V1モデルの概略図 Li (1998, 1999, 2001)を参考に作成(B), (C)

開発したV1モデルは、V1顕著性仮説に基づき、視覚的顕著性の計算をシミュレートするもの であり、Li (1998, 1999, 2001)の数理モデルを基礎としている。本研究では、消える錯視を入力 として用い、V1での顕著性計算と消失効果の発生メカニズムを解析することを目的としてい る。モデルは、網膜で事前処理された視覚入力が、0からπを12等分した方向選好性を持つ興奮性 および抑制性ニューロンペアで構成された神経ネットワークに入力される構造を持つ(図A)。 ニューロン間の水平接続には、顕著な特徴を強調する興奮性結合と冗長な情報を抑える抑制性結 合が含まれ、視覚空間内の顕著性マップを形成する(図B, C)。また、背景入力は刺激がない場 合でも一定の活動を維持する。本モデルを用いることで、消える錯視がV1内のニューロン活動 や知覚に与える影響を明らかにすることを目指している。

3) V1モデルによる消える錯視の距離依存性再現

縦縞および横縞の消える錯視に対する距離依存性を評価するため、観察距離50cmおよび100cm における興奮性ニューロンの平均発火率を計算し、その結果をヒートマップとして可視化した ((A)縦縞50cm, (B)縦縞100cm, (C)横縞50cm, (D)横縞100cm)。モデルでは視覚野を三次元空間と して定義し、方向選択性を持つニューロンネットワークを構築した。入力刺激として消える錯視 を模した方向データを与え、刺激強度やニューロン間の結合特性を調整することで消える錯視の 特性を再現した。シミュレーションの結果、観察距離および方向条件に応じて文字領域と縞領域 の平均発火率比に明確な違いが確認された。垂直方向では、距離の増加により縞領域の干渉が弱 まり、文字領域での発火優位性が増加することで消失効果が低下した。一方、水平方向では距離 の増加が文字領域の消失効果を緩和し、視覚的バランスを回復する作用が見られた。これらの結 果は、視覚実験で得られた消失効果が視覚野内の神経活動の空間的分布および抑制的相互作用に 起因する可能性を支持しており、消える錯視の発生機序の一因を示唆する重要な知見を提供し た。

Condition	Text Area	Stripe Area	Text/Stripe Ratio
Vertical 50cm	3.3229	3.2382	1.0262
Vertical 100cm	3.2817	2.8770	1.1407
Horizontal 50cm	4.8722	5.8722	0.8297
Horizontal 100cm	5.6006	5.6235	0.9959

表5. 高コントラスト縞刺激に対する文字部分の発火率平均の比

4) 消える錯視の収縮率および刺激サイズの与える影響

知覚実験では、消える錯視を異なる二つの距離で観察した場合の消失効果を測定した。しかし、 観察距離を変化させた場合、縞模様に対する背景刺激の比率は変化していなかった。そこでV1モ デルを用いて、それらの比率を0%-50%まで連続的に変化させ、消える錯視における収縮率および 刺激サイズの影響を解析した(図3(A)縦縞,(B)横縞)。加えて、顕著性を定量的に評価するrと zの値も計算により取得した(図3(C)縦縞,(D)横縞)。



図3. 背景刺激の収縮率変化におけるシミュレーション結果

〈参考文献〉

Li, Z. (1998). *A neural model of contour integration in the primary visual cortex*. Neural Computation, 10(4), 903-940.

Li, Z. (1999). Visual segmentation by contextual influences via intracortical interactions in primary visual cortex. Network: Computation in Neural Systems, 10(2), 187-212.

Li, Z. (2001). *Computational design and nonlinear dynamics of a recurrent network model of the primary visual cortex*. Neural Computation, 13(8), 1749-1780.

Wade, N. (1990). Visual allusions: Pictures of perception. London: Lawrence Erlbaum.

Wade, N. J. (2017). *Hidden images*. In A. G. Shapiro & D. Todorović (Eds.), *The Oxford compendium of visual illusions* (pp. 774–780). New York, NY: Oxford University Press.

Zenger-Landolt, B., & Koch, C. (2001). Flanker effects in peripheral contrast discrimination

— psychophysics and modeling. Vision Research, 41(27), 3663-3675.

1. 序論

1.1 背景

錯視研究は、知覚科学、認知心理学、神経科学において重要な学問的役割を担っている。視覚 系が外界からの情報をどのように処理し、解釈しているのかを理解するためには、錯視が極めて 有用なツールである。錯視は、視覚系が入力情報を単なる物理的なデータとして受け取るだけで なく、それを脳内で複雑なプロセスによって加工し、再構築することを示している。この処理 は、人間が現実世界を知覚する際の脳内メカニズムの根本にあり、視覚研究における基盤を提供 している。

視覚系は、網膜から受け取る視覚情報を脳内で解釈し、意味のある視覚体験を構築する過程 で、多くの補完的な処理を行っている。Eaglemanは、錯視を通じて視覚皮質の処理メカニズム が解明され、脳が受動的なデータ処理者ではなく、情報を補完し、構築する役割を果たしている ことを示した(Eagleman 2001)。これにより、錯視は視覚認知の理論モデルを形成する根拠とな り、視覚情報処理の特性を探るための必須要素となっている。加えて、錯視は視覚系がどのよう に予測と統合のプロセスを通じて情報を処理するのかを解明するためのモデル構築にも貢献して いる。脳は外部からの入力情報を基に、過去の経験や先験的な知識を用いて予測を行い、効率的 に情報を処理する。この点について、Kerstenらは、視覚情報の解釈がベイズ推論モデルに基づ いていることを示し、脳が確率的な予測を活用して錯覚を生み出す過程を詳述している(Kersten et al. 2004)。この理論は、視覚系が不確実な状況で最も有力な仮説を構築し、結果として錯視が 生じるメカニズムを裏付ける。

また、錯視は注意、記憶、意思決定といった他の認知プロセスに与える影響を調査するための ツールや、神経科学的観点における脳内での視覚情報処理を観察する手段としても活用される。 PashlerとJohnstonは、錯視を用いて認知的負荷が視覚情報処理に与える影響を評価し、複数の視 覚的意味を含む情報がどのように選択的に処理されるかを解明した(Pashler and Johnston 1998)。その結果、視覚情報処理が他の認知プロセスと密接に関連していることが明らかにされ た。Murrayらは、fMRIを用いて錯視が視覚野において引き起こす活動を観察し、視覚皮質がど のように形状や大きさを再解釈するかを明らかにした(Murray et al. 2006)。この研究は、錯視が 視覚皮質内での情報処理の理解を深め、脳内の視覚的再構築プロセスの一端を示している。

錯視研究の理学的価値についてはすでに述べてきたが、これに加えて、錯視研究による知見 は、AIやBMI(脳-機械インターフェース)といった工学的応用にも重要な示唆を与えている。AI の分野では、錯視の研究が人間の視覚認知モデルを基にしたニューラルネットワークの設計に貢 献している。錯視は、人間が物理的な現実とは異なる解釈を行う視覚処理の特性を示しており、 これを参考にしてAIモデルは複雑な視覚情報を効率的に処理するアルゴリズムを構築している。 例えば、畳み込みニューラルネットワーク(CNN)は、人間の視覚野の階層的な情報処理を模倣 するために開発されており、錯視に基づくデータをトレーニングに用いることで、人間と類似し た視覚バイアスを持つAIが生まれている。その結果、AIが人間に近い視覚認知を実現し、画像認 識や自動運転技術といった応用が進む。BMIの分野でも錯視研究は有用である。BMIは脳からの 神経信号を解読して機械を操作する技術であり、視覚情報の理解がその基盤となる。錯視の研究 は、脳がどのように情報を処理し、時には誤った視覚知覚を生じるかを理解する助けとなり、よ り自然で直感的なインターフェースの開発に貢献している。特に、視覚系が予測を行いながら情 報を処理するメカニズムを利用することで、BMIの精度向上が期待され、使用者がより直感的に システムを操作できるようになる。これらに加えて、進化的な視点に基づいた錯視の研究も、AI やBMIの工学的応用に貢献している。PurvesとLottoは、視覚系が生物学的制約と環境適応を基 に進化したことを示しており、この知見はAIが人間の視覚特性を再現し、現実世界でより人間の 視覚に近い認知を行うためのアルゴリズム設計に役立っている(Purve and Lotto 2003)。こうし た研究により、視覚情報処理の効率や信頼性が向上し、AIやBMI技術の精度が高まるとともに応 用範囲も拡大している。このように、錯視研究は、視覚科学、認知心理学、神経科学において重 要な知見を提供するだけでなく、AIやBMIなどの工学的応用を含む多様な分野においても大きな 影響を及ぼしている。総じて、錯視研究は人間の認知メカニズムの理解と、これを応用した技術 の進展の両方に貢献する極めて重要な研究領域と言える。

1.2 消失効果に関する研究

錯視研究における重要なテーマの一つに「消失効果(extinction effect)」がある。この効果は、 視覚的要素が周囲の高コントラスト部分によって抑制され、認識が困難になる現象を指す。 Wadeによる研究では、コントラストの低い少女の顔が、高コントラストで空間周波数の高い格 子の中に埋め込まれた場合、格子が明瞭に見える一方で、顔の輪郭が消失することが示されてい る(Wade 1990)。しかし、画像をぼやけさせたり、遠くから観察することで、顔は再び明瞭に認 識される。この現象は、「隠された画像(hidden images)」と呼ばれる視覚現象に関連しており、 「高コントラストで空間周波数の高い輪郭は、低コントラストで空間周波数の低い要素の視認性 を抑制する」という特性がその基盤にある(Wade 2017)。さらに、図1aでは、観察者が十字を注 視すると、コントラストの低い細い線分が急速に消失する様子が観察される。一方で、これらの 線分が均質な背景上に配置された場合(図1b)、消失は起こらない(Kitaoka, A., and Anstis, S. 2021)。この結果は、コントラストの低いエッジとその周囲の高コントラストエッジの相互作用 が消失効果を引き起こす本質的な要因であることを示している。Zenger-LandoltとKochは、こ の現象が視覚的エッジの見かけ上のコントラストが周囲のエッジ特性に依存することを報告して おり、視覚抑制のメカニズムを支持している(Zenger-Landolt and Koch 2001)。

この消失効果は、足踏み錯視(footsteps illusion)やその逆バージョン(逆足踏み錯視)にも関連し ている。低コントラストのエッジが周囲の高コントラストエッジによって抑制されることで、位 置や運動が捕捉される現象が観察される(Howe et al., 2006)。これらの錯視現象は消失効果と深 く結びついており、これを通じて錯視の基盤となるメカニズムが共有されている可能性がある。 消失効果のさらなる理解は、錯視の理論的枠組みを強化し、視覚認知における基礎的なメカニズ ムを解明する上で極めて重要である。

このような消失効果において、高コントラスト部分と低コントラスト部分のエッジが形成する 角度も、重要な要因となる可能性がある。視覚野(V1)には方向選択性細胞が存在し、特定の角度 や方向に敏感であることが知られている。このため、エッジ間の角度が一致する場合、視覚的抑 制が強まり、低コントラスト部分が消失しやすくなる。一方で、エッジが直交する場合や角度が 異なる場合、抑制が弱まり、低コントラスト部分が認識されやすくなる可能性が示唆される。 Zenger-Landolt and Koch (2001)の研究は、視覚的エッジ間の抑制効果が方向や空間周波数に依 存することを示しており、角度がこの効果に影響を与える可能性を示唆している。また、Howe et al. (2006) の研究では、足踏み錯視や逆足踏み錯視において運動方向とエッジ方向の角度の関 係が錯視の強度に寄与することが確認されている。この角度依存性の仮説は、特に視覚野(V1)に おける方向選択性細胞の性質と一致している。これらの細胞は特定の方向や角度に最も強く反応 し、エッジが互いに干渉する場合には抑制効果が変化する。したがって、角度が一致する場合、 抑制が強まり、消失効果が増大する可能性がある。この仮説を検証するには、エッジの角度が異 なる条件下で系統的に実験を行い、心理物理学的データやニューロイメージングを通じた神経活 動の解析が必要となる。結論として、角度情報は消失効果における重要な要因であり、この関係 を詳細に研究することは、錯視現象や視覚的抑制メカニズムの理解をさらに深化させると考えら れる。





図1. 低コントラストのエッジの消滅効果。(a) 縞模様の条件。黒い縞に囲まれた右上の青い細い線 分と白い縞に囲まれた左下の黄色い線分、つまり低コントラストのエッジは、観察者が十字を注 視すると急速に消滅するように見える。他の2つの高コントラストの線分はほとんど消えない。(b) 均一な背景条件。右上と左下の線分はコントラストが低いが、急速に消えるようには見えない(引 用:Kitaoka, A., and Anstis, S. 2021)。

1.3 研究目的

本研究は、発生メカニズムが未だ解明されていない「消える錯視」(2.1節参照)における消失 効果の発生機序を明らかにし、錯視観察時における一次視覚野(V1)での視覚情報処理の理解を深 めることを目的としている。これまでの研究(Zenger-Landolt and Koch 2001)(Howe et al., 2006)では、消失効果を伴う錯視の基本的な特性が明らかにされている一方で、消える錯視に特 有の距離依存性に関する詳細な分析は十分に行われていない。本研究では、このギャップを埋め るため、観察距離が消える錯視に及ぼす影響を定量的に評価する知覚実験を実施し、取得したデ ータを詳細に解析した。また、消える錯視の発生メカニズムを解明するために、一次視覚野(V1) が視覚情報処理において顕著性マップを形成し、視覚的注意を誘導する役割を担うとするV1顕 著性仮説(3.3節参照)を採用した。この仮説は、消える錯視における独特な消失効果が、V1内の 顕著性マップにおける活動変化と密接に関連している可能性を示唆している。また、エッジの角 度や観察距離など、消失効果に影響を与える要因がV1でどのように処理されるのかを理解する ための有力な枠組みを提供すると考えた。この仮説のもとで検証するためにV1顕著性仮説に基 づくモデルを開発し、消える錯視の距離依存性のシミュレーションを実施した。このシミュレー ションを通じて、消える錯視の消失効果の発生機序とV1内での顕著性処理との関係を明らかに し、錯視の神経学的メカニズムに関する理解をさらに深化させることを目指す。

2. 消える錯視を用いた知覚実験

2.1 消える錯視

消える錯視(図2)は、特定の視覚刺激において知覚される独特な錯視現象であり、任意のテキス トやイラスト画像を、ストライプ、ドット、波状パターンなどの規則的な繰り返しを持つ背景画 像に重ね合わせることで生成される。この錯視は、被写体が観察者の視野内で「消える」ように 見える消失現象を引き起こすが、これまでの研究において消える錯視の消失効果についての定量 的なデータはほとんど報告されていない。また、この錯視がどのような神経学的および視覚的処 理を通じて発生するのか、そのメカニズムは未解明である。

消える錯視の消失効果については、視覚系における顕著性処理や選択的注意、周辺抑制などの 複雑な神経機構が関与している可能性が示唆されており、視覚認知における重要な研究対象とな りうる。このような背景により、消える錯視の発生機序を解明することは、視覚情報処理に関す る理論的理解を深め、一次視覚野(V1)における知覚機能をより明確にするために意義があると考 えられる。



図2. 消える錯視の構造と作成方法

2.2 知覚実験の概要

消える錯視の消失効果は、画像のコントラストやぼかしの効果に影響するという報告がある (Wade 2017)。そこで、消える錯視の距離依存性を定量的に測定するために知覚実験を実施し た。知覚実験の作成には、PsychoPy(Peirce, J. et al. 2019)を用いた。PsychoPyは、心理学実験や 神経科学実験の設計および実行を支援するために開発されたオープンソースのソフトウェアパッ ケージであり、視覚、聴覚、運動応答など多様な刺激を精密に制御するための柔軟性を提供す る。Pythonを基盤とし、視覚刺激を正確に表示するためのPygletやOpenGL、音刺激を処理する ためのsounddeviceなどのライブラリを利用することで、ミリ秒単位の正確なタイミング制御を 実現している。研究者はGUIを使って簡単に実験を構築できるBuilderモードと、Pythonスクリ プトで詳細なカスタマイズが可能なCoderモードの二つのインターフェースを活用できる。さら に、オンライン実験プラットフォームであるPavloviaと連携し、Webブラウザ上での実験実施が 可能であるため、リモートでの被験者募集とデータ収集が容易である。PsychoPyは認知心理学 や神経科学における視覚的認知、記憶、注意などの実験で高い精度を持つ一方で、複雑なタスク の設計にはPythonの知識が求められ、特定の環境に依存したタイミングの問題が生じる可能性が ある。しかし、PsychoPyのオープンソース性とオンライン対応能力は、従来の実験室内研究だ けでなく、オンライン実験の拡大にも大いに寄与している。これらの利点から本研究では PsychoPyを採用した。

被験者は、成人男女18名で全員晴眼者(眼鏡、コンタクトレンズ等の矯正も含む)である。被験 者には実験開始前に、実験機器の操作方法や、実験構成について説明し、それぞれの被験者が適 切に実験操作を行えるようにした。また、結果に公平を期す為、被験者には実験の目的を伝えな かった。実施期間は、2022年12月1日から12月15日までの二週間で、全て横浜市立大学にある理 学系研究棟内の一室で行った。さらに、被験者が静かな状態で実験に集中できるように、必要以 上に話しかけないようにした。実験では、まず、被験者にデスク上に置かれた、実験用PCディ スプレイに正対するように椅子に座ってもらった。その後、マニュアルによって実験の操作法を 熟知した上で実験を開始した。被験者が実験中に行う操作は、画面上にある三つのボタンをクリ ックするのみであり、操作自体はシンプルである。被験者は、ランダムな濃さで表示されるター ゲット画像(実験画面左)と、錯視画像中の文字(実験画面右)の濃さが等しく知覚できるように文 字の透明度を調節する操作を何度か繰り返し行った。



図3. 知覚実験画面. 実験的で使用したディスプレイは、12インチ(2304×1440)で、幅28.05 cm、 高さ19.65 cmである。実験では、PCのディスプレイ右側に一辺が8.0 cmの正方形となるように表示 した。

2.3 縦縞と横縞の消える錯視の距離依存性測定

図4は、18名の被験者に対して実施した消える錯視の知覚実験における消える錯視の距離依存性 の測定結果を示している。左図は縦縞パターン、右図は横縞パターンの錯視を50 cmおよび100 cm の距離で測定した結果を表す。縦ストライプの条件(左図)においては、被験者の錯視による認識誤 差が距離に応じて減少する傾向が確認された。50 cm条件では、回帰線の傾きが負であり、錯視の 強さが背景に隠される文字の濃さに依存していることが示唆された。100 cm条件では、データポ イントは全体的に50 cm条件より低い値を示し、距離が増加すると錯視による認識誤差が減少する ことが見て取れる。一方、横縞の条件(右図)においても同様の傾向が観察されたが、縦縞の条件と 比較して全体的な錯視による認識誤差の変化は小さい。50 cm条件の回帰線はオレンジ色の実線で 示され、負の傾きを示したが、その傾斜は縦縞パターンほど急ではなかった。100 cm条件におい ても、消える錯視による認識誤差は減少傾向を示したが、データの分布はより分散していた。両 条件において、被験者の知覚に距離が影響を与えることが確認され、消える錯視の強さは近距離 で顕著であり、距離の増加とともに減少する傾向にあることが示された。この結果は、消える錯 視において視覚的な適応や注意の分配が距離によって変化することを示唆している(表3)。

各条件における正の認識誤差(被験者が実際の濃さよりも強く知覚したケース)の統計情報(表2) に基づくと、縦縞パターンにおいては、50 cmの距離での平均正の誤差が0.0606であり、標準偏差 は0.0379、最小値は0.01、最大値は0.16であった。これは、近距離における消える錯視の影響が強 く、被験者が刺激を実際より濃く知覚することが多いことを示している。一方、100 cmの距離で は平均正の誤差は0.0486に減少し、標準偏差は0.0401、最小値は0.01、最大値は0.14となり、距離 が増加するにつれて錯視の影響が弱まることが示唆される。横縞パターンでは、50 cmの距離にお いて平均正の誤差が0.0391、標準偏差は0.0266であり、縦縞に比べて小さい値を示した。これは横 縞条件の消える錯視が縦縞条件よりも弱いことを示唆している。最小値は0.01、最大値は0.11で、 誤差の範囲も狭かった。100 cmの距離では平均正の誤差が0.0238とさらに小さくなり、標準偏差は 0.0116、最小値は0.01、最大値は0.05となり、誤差のばらつきも小さくなっている。これにより、 距離の増加が横縞パターンにおいても消える錯視の影響を弱めることが確認された。

全体として、縦縞条件では近距離での錯視の影響が顕著であり、距離が増加すると錯視による 認識誤差が減少する傾向が見られた。横縞条件でも距離依存性が確認されたが、縦縞条件よりも 平均誤差が小さく、全体的に消える錯視の影響は弱いことが示された。さらに、横縞条件では標 準偏差が小さく、被験者間の知覚のばらつきが少ないことが特徴である。これらの結果は、消え る錯視の効果が縦縞と横縞で異なり、縦縞条件で特に観察距離による影響が顕著であることを示 している(表4)。



図4. 縦縞と横縞の消える錯視の距離依存性の測定結果. 横軸はターゲットテキストの濃さを表し、 縦軸は、被験者が知覚した錯視画像中の文字の濃さとターゲットテキストの濃さとの差を表す。



図5. 縦縞と横縞の観察距離毎の比較結果. 観察距離50cmおよび100cmにおける縦縞錯視と横縞 錯視の消失効果を比較したところ、消える錯視の効果が縦縞と横縞で異なり、縦縞条件で特に観 察距離による影響が顕著であることを示した。

A1. 伯人う咱民によう応報医生の他自由我				
Condition	Mean Error	Standard	Min	Max
		Deviation		
Vertical 50 cm	0.0237	0.0593	-0.09	0.16
Vertical 100 cm	-0.0031	0.0677	-0.14	0.14
Horizontal 50 cm	0.0089	0.047	-0.11	0.11
Horizontal 100 cm	-0.0131	0.0366	-0.09	0.05

表1. 消える錯視による認識誤差の統計情報

表2. 消える錯視による正の認識誤差の統計情報

Condition	on Mean Standard		Min (Positive)	Max
	Positive Error	Deviation		(Positive)
		(Positive)		
Vertical 50 cm	0.0606	0.0379	0.01	0.16
Vertical 100 cm	0.0486	0.0401	0.01	0.14
Horizontal 50 cm	0.0391	0.0266	0.01	0.11
Horizontal 100 cm	0.0238	0.0116	0.01	0.05

表3. 二群間T検定(観察距離50cm	100cm 有意水準0.05)	
Mask Image	p-value	
Vertical stripe		0.031
Horizontal stripe		0.008

表4. 二群間T検定(縦縞と横縞の消える錯視50cm, 100cm 有意水準0.05)

Condition	p-value
Vertical vs Horizontal 50 cm	0.018
Vertical vs Horizontal 100 cm	0.0008

3. 研究手法

3.1 一次視覚野(V1)

一次視覚野(V1)は、大脳皮質における視覚情報処理の最初の段階として機能し、後続の視覚処 理の基礎を形成する領域である。解剖学的には後頭葉の最も後部に位置し、網膜から視床の外側 膝状体(LGN)を介して情報を受け取る。V1は、高度に組織化された構造を持ち、空間的配置や 視覚的特徴に対応するトポグラフィックなマップが存在する(Hubel & Wiesel, 1962; 1977)。この 領域は、視覚的特徴、特にエッジ、線、方向、コントラストなどの初期処理に特化しており、視 覚野全体の情報処理階層の中で中心的な役割を果たしている(Livingstone & Hubel, 1988; Zeki, 1993)。

V1の働きは単なる物理的特徴の検出に留まらず、視覚的な錯視を含むより高度な知覚現象にも 関与している。錯視画像の観察時、V1は視覚的情報の物理的刺激と実際の知覚との間の乖離を 示す。この知覚現象は、V1における「同方向抑制(iso-feature suppression)」や周辺抑制などの 文脈依存的な処理によって説明されることが多い。たとえば、周囲の視覚刺激がある特定のニュ ーロンの活動を抑制し、知覚的に強調される部分が生じる。このような抑制メカニズムは、錯視 のような複雑な視覚現象において、物理的刺激の単純な集合を超えた知覚的な顕著性を生み出す (Hubel & Wiesel, 1962; Kandel et al., 2000)。

錯視におけるV1の関与は、顕著性マップ理論とも関連が深い。Li Zhaopingらの研究では、V1 の活動が視覚的注意や選択に関与し、知覚的顕著性を生み出すことが示されている(Li, 2002; Zhaoping, 2008)。これらの研究は、V1が単なる低次処理の場であるに留まらず、視覚的注意を 誘導するボトムアップ型の顕著性マップを形成することで視覚的知覚全体に寄与することを示唆 している。V1のこのような働きは、錯視のような複雑な現象において、視覚系がどのように情 報を処理し、知覚を形成するかを理解するための鍵となる。

3.2 神経回路シミュレーション

神経回路シミュレーションは、脳内のニューロン間の相互作用や神経系の複雑な動態をモデル 化し、理解するための強力な手法である。特に視覚系では、一次視覚野(V1)を含む視覚経路のシ ミュレーションが、視覚情報の処理メカニズムを明らかにするために利用されている。これらの シミュレーションは、視覚的注意や顕著性の形成、錯視の発生、さらには情報伝達やフィードバ ックメカニズムの研究に役立つ。神経回路シミュレーションは、特定のニューロン活動パターン が視覚刺激にどのように応答するかを詳細に調べることができ、V1内の「同方向抑制」や「周辺 抑制」といったメカニズムを再現することで、視覚的知覚と刺激の関係を明らかにする。これに より、錯視のような実際の物理的刺激と知覚との乖離を説明し、視覚系の情報処理の基礎を理解 することが可能となる(Hubel & Wiesel, 1962; Zeki, 1993)。

神経回路シミュレーションのメリットは、実験的手法では困難な条件下でのニューロンの挙動

を仮想的に再現できる点である。これにより、大規模な実験を要することなく、異なる条件下で のニューロン間の相互作用やシステム全体のダイナミクスを観察できる(Kandel et al., 2000)。視 覚系の研究では、例えば、V1が顕著性マップを形成し視覚的注意を誘導するという仮説の検証に おいて、Li (2002)の研究はシミュレーションを用いて理論を裏付ける具体的な例となっている。 また、Zhaoping (2008)は心理物理実験とシミュレーションを組み合わせて、V1が顕著性を生み出 すメカニズムを確認している。

このように、神経回路シミュレーションは視覚系の機能をより深く理解するための重要なツー ルであり、視覚的注意、情報処理の効率性、顕著性マップの役割といった多岐にわたる視覚現象 の解析に用いられる。その結果、視覚認知に関する新たな理論的枠組みを提供し、実験的な限界 を補完することができる(Livingstone & Hubel, 1988; Li, 2002)。

3.3 V1顕著性仮説(V1SH)

V1顕著性仮説(Le Zhaoping 2002)は、一次視覚野(V1)が視覚的注意を誘導するボトムアップ 型の顕著性マップを構築するという仮説である。この仮説では、V1の神経活動が視覚入力を受 けて空間的な顕著性をコードし、視覚的選択を誘導する役割を果たすとされる。視覚刺激中で最 も顕著な要素はV1内で最大の神経応答を引き起こし、その結果、その領域は他の場所よりも強 く注意を引き付ける。従来の理論では、視覚的顕著性は高次視覚領域や特定の特徴マップの集合 に依存していると考えられてきた。しかし、V1顕著性仮説はこの見解に異議を唱え、V1が視覚 的注意のボトムアップ要因として顕著性を直接形成することを提唱している。V1内には視覚的 特徴(例:色、形、方向など)に応答するニューロンが存在し、同時に、近接する同じ特徴を持つ 刺激に対して「同方向抑制(iso-feature suppression)」と呼ばれる抑制が働く。このメカニズムに より、周囲と異なる特徴を持つ刺激が強い応答を引き起こし、それが顕著性として認識される。 この仮説は、視覚探索やテクスチャ分割といった心理物理学的行動の説明においても重要な理論 的枠組みを提供する。具体的な実験的証拠は、V1の活動がこれらの視覚的行動を説明できるこ とを示しており、この仮説の妥当性を支持している(Koene,A.R.,& Zhaoping,L. 2007)。これによ り、V1は単なる低次視覚処理を超えて、視覚的注意と選択における中心的な役割を担うことが 示唆されている。

16

4. V1顕著性仮説に基づくモデル開発

4.1 V1モデルの概要

本研究では、消える錯視の神経基盤を解明するために、V1顕著性仮説に基づくモデルを開発 した。V1顕著性仮説は、一次視覚野(V1)が視覚情報を処理する際に顕著性マップを形成し、視 覚的注意を誘導する役割を果たしているとする理論である(Li, 2002)。この理論に基づき、V1の 活動が視覚刺激に対する相対的な顕著性を決定し、注意の焦点を誘導することが示唆されてい る。開発したモデルは、V1における神経活動をシミュレートし、消える錯視の発生メカニズム を理解するために設計された。特に、Li (1998, 1999, 2001)による既存の数理モデルを参考にし つつ、再帰的な神経接続と抑制・興奮性の相互作用を統合することで、視覚空間内の顕著性を計 算する仕組みを構築した。このモデルにより、消える錯視がV1内でどのように処理され、視覚 的顕著性としてどのように反映されるかを分析することができる。

シミュレーションでは、消える錯視を入力として与え、V1における顕著性マップの形成と神 経活動の変化を解析した。これにより、錯視の発生メカニズムがV1の神経基盤とどのように関 連しているかを明らかにすることが可能である。モデルの数理的基盤は、興奮性ニューロンと抑 制性ニューロン間の相互作用を記述する微分方程式により構築されており、顕著性計算に必要な 抑制・興奮性の相関を詳細に再現している(Li, 1998, 1999, 2001)。本研究のV1モデルは、消える 錯視の神経基盤を解明し、V1が顕著性処理において果たす役割をより深く理解するための新た な視点を提供するものである。

4.2 モデルの詳細な説明と議論

4.1で述べたように本研究で開発したV1モデルは、V1顕著性仮説に基づき、視覚的顕著性の計 算をシミュレートするものである。このモデルはLi (1998, 1999, 2001)による数理モデルを基礎 としており、V1が視覚入力にどのように反応し、顕著性を計算するかを再現することを目的と している。特に本研究では、消える錯視を入力として用い、V1における顕著性計算がどのよう に変化し、消失効果が生じるのかを分析することに焦点を当てている。これにより、消える錯視 の発生機序を解明するための糸口を提供することを目指した。

錯視を入力とすることは、視覚系の特性や処理メカニズムを理解するための独自のアプローチ である。錯視は、視覚システムがパターン認識、空間処理、色覚、動きの知覚をどのように行う のかを示唆し、神経科学や心理学において重要な研究対象とされている。これを入力とすること で、標準的な視覚入力では観察しにくい特定の神経応答やネットワークダイナミクスを引き出 し、脳がどのように情報を統合し、複雑な視覚環境を処理するのかを明らかにできる。また、錯 視によって誘発される予測困難なニューロンの活動や異常な応答パターンが視覚系内でどのよう に調整・補正されるかを観察することで、視覚情報処理における適応的メカニズムや視覚野内の シナプス結合の役割についても新たな理解が得られる。本研究のように錯視を入力として用いる アプローチは、神経回路モデルの妥当性を検証・改良し、視覚研究における新たな道を切り開く ものであり、視覚系の理解において学術的なオリジナリティを示す。

1. モデル構造と基本設定

V1モデルは、図6(A)のように網膜で事前処理された視覚入力 *I_{i0}* がV1内の神経ネットワーク に入力される構造を持つ。V1内の各カラムは、0から π の範囲を12等分した方向選択性を持つ 興奮性と抑制性のニューロンペアで構成されており、これにより多様な方向に対応する反応を可 能にしている。この方向選択性の分布により、視覚空間内の顕著性を動的に計算し、入力された 視覚刺激に対して効果的に応答できる。本研究では、特に消える錯視を視覚入力として用い、 V1内のニューロン活動がこの刺激によってどのように変化し、知覚に影響を与えるかを解析し た。図6(B)は、モデル内の神経要素を示しており、興奮性ニューロンと抑制性ニューロンがニュ ーロンペアとして相互接続されている。この構造により、視覚入力*I₁₀がニューロン*活動に与える 影響を解析できる。背景入力*I_c*は、視覚刺激がない場合でも一定の活動を維持する役割を持つ。 図6(C)に示されるニューロン間の水平接続は、同じ方向に反応するニューロン間の抑制性結合 と、異なる方向に反応するニューロン間の興奮性結合で構成されている。興奮性結合は顕著な特 徴を強調し、抑制性結合は冗長な情報を減らして視覚的選択を調整する。これにより、V1内の 応答が視覚的注意を引き起こす顕著性マップとして形成される。



図6. V1モデルの概略図. Li (1998, 1999, 2001)を参考に作成(B), (C)

2. 数学的記述と動作

モデル内の興奮性および抑制性ニューロンの動作は、以下の微分方程式Li (1998, 1999, 2001)で 記述される。

<興奮性ニューロンの膜電位更新式:>

$$\dot{x}_{i\theta} = -\alpha_x x_{i\theta} - g_y(y_{i,\theta}) - \sum_{\Delta \theta \neq 0} \psi(\Delta \theta) g_y(y_{i,\theta+\Delta \theta}) + J_o g_x(x_{i\theta}) + \sum_{j \neq i,\theta'} J_{i\theta,j\theta'} g_x(x_{j\theta'}) + I_{i\theta} + I_o$$
(1)

<抑制性ニューロンの膜電位更新式:>

$$\dot{y}_{i\theta} = -\alpha_y y_{i\theta} + g_x(x_{i\theta}) + \sum_{j \neq i, \theta'} W_{i\theta, j\theta'} g_x(x_{j\theta'}) + I_c$$
⁽²⁾

それぞれの式の各項は以下の役割を果たす。

- α_x, α_y:これらはそれぞれ興奮性ニューロンおよび抑制性ニューロンの膜電位減衰係数を 表し、時間経過に伴う膜電位の自然減衰をモデル化する。
- g_x(x),g_y(y):発火率をモデル化するシグモイド関数であり、入力電流の大きさに対して 出力の発火率を調整する非線形特性を持つ。
- ψ(Δθ):同一ハイパーカラム内における抑制の広がりを示す関数であり、特定方向間での競合をモデル化する。
- *J*₀:ニューロンの自己興奮を表し、ニューロンが自らの発火を通じて自身に影響を与える様子を示す。
- J_{iθ,jθ}:シナプス接続における興奮性ニューロン間の水平接続を表し、特定位置における ニューロンが他のニューロンに与える影響の強さを示す。
- *I_{iθ}, I_o*:視覚入力および外部入力を表し、視覚情報を外部から取り込む過程を表現する。
- W_{iθ,jθ'}:シナプス抑制の水平接続を表し、あるニューロンが他のニューロンの発火を抑 制する関係を示す。
- I_c:背景入力を表し、視覚野内で全体的な調整役を果たす入力を意味する。

また、上記のそれぞれの詳細なパラメータは、Li (1998, 1999, 2001)の値を用いた。

視覚入力 *I_{i0}* は、視覚刺激の強度とニューロンの方向選択性を考慮して計算される。まず、消 える錯視の縞刺激に対する入力強度は、高刺激値(3.5)が設定され、これは縞模様の顕著な視覚 的特性を反映するものである。一方、入力が方向選択性の範囲外の角度を持つ場合、入力強度は 0とし、それ以外の位置では低刺激(1.2)とした。さらに、ニューロンの方向選択性による調整を 行うため、モデル内の各ニューロンが持つ方向選択性 θ と入力画像の角度との差を計算した。 この差分diff_orientationは $\frac{\pi}{2}$ を超える場合に π との差で補正される。この調整により、方向選 択性が最も近い入力角度に対して強い応答が得られるようにしている。方向選択性に基づく重み 付けは、以下の関数 ϕ を用いて行った。

$$\phi = \frac{\exp(-\text{diff_orientation})}{\pi/8}$$
(3)

この関数は、ニューロンの方向選択性と入力刺激の一致度を指数関数的に反映し、最終的な入力 値 *l_{i0}* は視覚刺激の強度に、この重みを掛け合わせることで求められる。

$$I_{i\theta} = \text{input}_{value} \times \phi \tag{4}$$

この処理により、視覚入力はニューロンの方向選択性に基づいて適切に調整され、V1モデルに おける顕著性マップの形成に寄与する。視覚的注意の計算において、こうした入力の調整はニュ ーロンの選択的な反応を高め、顕著性の際立ちを促進する。

3. 顕著性計算のメカニズム

このV1モデルは、視覚入力として与えられた消える錯視を解析するため、再帰的な神経接続 を通じて顕著性計算を実行する。興奮性結合は、視覚刺激の顕著な特徴を強調し、抑制性結合は 周辺の冗長な情報を制御して視覚的注意の焦点を調整する。このプロセスにより、入力された消 える錯視がV1内でどのように処理され、顕著性が変化するかを観察することが可能となる。

4. 消える錯視入力への特化

本モデルは、消える錯視の特性に特化して設計されており、特定の視覚刺激がV1内でどのよ うに抑制・興奮のバランスを変化させるかを解析する。このバランス変化が顕著性マップにどの ような影響を与え、視覚的知覚にどのように関与するかを評価することで、消える錯視の神経基 盤に対する理解を深めることを目指した。

4.3 モデルの動作テスト

図7は、開発したV1モデルの動作確認を目的として、Li (1998, 1999, 2001)で使用された単純な 線分のみからなるテスト入力を用い、12×12×12サイズのモデルにおける顕著性領域の検出を検証 した結果を示している。結果として、縦線と横線の境界領域において周辺領域と比較して興奮性 ニューロンの平均発火率が相対的に高い値を示した。この結果は、本研究で構築したV1モデル が正常に機能し、顕著性の高い領域を適切に検出できることを示唆している。



図7. V1モデルの動作確認テスト結果.

5. V1モデルを用いた消える錯視のシミュレーション

5.1 観察距離ごとの錯視観察時のシミュレーション

知覚実験の結果を踏まえ、二通りの観察距離に対応した縦縞および横縞消える錯視の距離依存 性のシミュレーションを行った。結果としてV1モデルにおける興奮性ニューロンの平均発火率 をヒートマップで表示した(図8,9)。視覚野を三次元空間と定義し、シミュレーションでは100 ×100×12個のニューロンペアからなるネットワークを使用した。各グリッドセルには12対の興 奮性および抑制性ニューロンが含まれるハイパーカラムが配置され、それぞれのニューロンは [0, π]の範囲で等間隔に分布する12の方向選択性をそれぞれ持つ。入力刺激として、特定の方 向を表現する度単位のデータをCSV形式で読み込み、ラジアンに変換した。このデータはニュー ロンの方向選択性との角度差に基づき、(3)式により刺激強度が調整された。ここで、 $\Delta \theta$ は刺 激方向とニューロンの方向選択性の差を示す。また、グリッド内の特定条件に基づいて刺激強度 が調整され、例えば、縦縞の消える錯視入力の場合、奇数列のグリッドセルにおいて90度に対応 するニューロンが最も高い刺激強度(3.5)を受けた一方、パディング部分に対応する180度の角 度を受け取ったニューロンには刺激が与えられないものとした(0)。それ以外の方向では低い入 力強度(1.2)が適用され、消える錯視のコントラストの差を再現するように調節した。各ニュ ーロンの活動には標準偏差0.1の正規分布ノイズが加えられた。シナプス結合は、距離dおよび角 度差 θ 1, θ 2 に依存して決定された。興奮性と抑制性の水平結合は、ニューロン間距離および角 度差に基づいて計算された。シミュレーションは時間ステップ幅0.1で計算され、総ステップ数 12で実行された。各時間ステップでニューロン活動は(1)(2)式を時間発展させることにより更新 された。実験結果として、興奮性ニューロンおよび抑制性ニューロンの活動を記録し、興奮性ニ ューロンの平均活動をヒートマップとして可視化した(図8,9)。また、ニューロン応答の平均値 や境界顕著性指標(ピーク対平均比およびzスコア)を算出した。

結果として得られたヒートマップ内の興奮性細胞の平均発火率を基に、文字領域(Text Area)、縞領域(Stripe Area)、およびその比率(Text/Stripe Ratio)を計算した。その結果、観 察距離および方向条件による明確な違いが確認された。垂直方向では、観察距離50cmにおいて 文字領域と縞領域の平均発火率はそれぞれ3.3229および3.2382とほぼ同等であり、比率は1.0262 を示した。一方、距離が100cmになると、文字領域の平均発火率(3.2817)が縞領域(2.8770) を上回り、比率は1.1407となった。この結果は、垂直方向では距離の増加に伴い文字領域での発 火が優勢となり、縞領域の干渉が弱まることで消失効果が低下することを示唆している。水平方 向では、50cmにおいて縞領域(5.8722)の平均発火率が文字領域(4.8722)を上回り、比率は 0.8297と1未満を示したが、100cmでは文字領域(5.6006)と縞領域(5.6235)の発火率がほぼ 等しくなり、比率は0.9959に近づいた。この結果から、水平方向では距離の増加が文字領域にお ける消失効果を緩和し、テキストと縞の視覚的バランスを回復させることが確認された。さら に、V1モデルによるシミュレーション結果は、視覚的な消える錯視が距離および方向に依存し て発生することを的確に再現しており、特に垂直方向では文字領域の消失効果が距離の増加によ り顕著に低下することが示されている。これらの結果は、視覚実験で観察された現象が、視覚野 における神経活動の空間的分布および抑制的相互作用に起因する可能性を示唆している。特に、 文字領域での発火抑制が縞領域からの干渉や距離に応じた注意資源の再分配によって生じること を支持しており、これが消える錯視の消失効果の発生機序の一因である可能性を明らかにした。

Condition	Text Area	Stripe Area	Text/Stripe Ratio
Vertical 50cm	3.3229	3.2382	1.0262
Vertical 100cm	3.2817	2.8770	1.1407
Horizontal 50cm	4.8722	5.8722	0.8297
Horizontal 100cm	5.6006	5.6235	0.9959

表5. 高コントラスト刺激に対する文字領域の発火率平均の比



図8. 縦縞消える錯視の距離依存性のシミュレーション. V1モデルにおける興奮性ニューロンの 平均発火率をヒートマップで表示(上図)および横断面の平均をとったグラフ(下図)



図9. 横縞消える錯視の距離依存性のシミュレーション. V1モデルにおける興奮性ニューロンの 平均発火率をヒートマップで表示(上図)および縦断面の平均をとったグラフ(下図)

5.2 消える錯視の収縮率および刺激サイズの与える影響

知覚実験では、消える錯視を異なる二つの距離で観察した場合の消失効果を測定した。しか し、観察距離を変化させた場合、縞模様に対する文字の比率は変化していなかった。そこでV1 モデルを用いて、それらの比率を連続的に変化させ消える錯視における収縮率(Shrinkage Rate) および刺激サイズの影響を解析した。結果としてV1モデルにおける興奮性ニューロンの平均発 火率をヒートマップで表示した(図11,12)。

図13に示す結果から、縦縞パターンでは収縮率の増加に伴い視覚的顕著性が非線形的に変化 し、振動しながら増加する傾向が確認された。これに対し、横縞パターンでは視覚的顕著性が収 縮率に対して振動しながら減少する結果を示した。この違いは、縦縞パターンにおける抑制性相 互作用の強化と局所的な神経活動の再分布が、視覚的注意の動的な集中を引き起こしている一方 で、横縞パターンでは活動の広がりと均一性が維持されることに起因すると考えられる。

さらに顕著性の空間的分布を定量化するための指標としてrとzを導入した。これらの指標は、 顕著性マップの特性を解析し、視覚的注意が特定の刺激に引き寄せられるメカニズムを解明する ために重要である。rは、視覚刺激の中で特定の領域が他の領域と比較してどの程度顕著性が高 いかを示す比率である。この値は、以下の式で計算されるLi (1998, 1999, 2001)。

$$r = \frac{S_{\text{peak}}}{\bar{S}} \tag{5}$$

ここで、(*S*_{peak})は顕著性マップ上のピーク値、(*Š*)は全体の平均顕著性である。rが高いほど、 その領域が視覚的に際立っていることを示し、特定の刺激が顕著性計算に与える影響を示唆す る。zは、顕著性の統計的な正規化値であり、以下の式で表されるLi (1998, 1999, 2001)。

$$z = \frac{S_{\text{peak}} - \bar{S}}{\sigma_s} \tag{6}$$

ここで、 (σ_s) は顕著性値の標準偏差を表す。z値は、特定の領域が統計的にどれほど顕著であるかを示す指標として機能し、顕著性分布のばらつきやピーク領域の重要性を定量化する。

図11および図12に示すニューロン活動の空間分布もこの結果を支持している。縦縞パターンで は収縮率の増加に伴い、ニューロン活動が不均一化し、縦方向の特定領域に活動が集中する現象 が観察された。一方、横縞パターンでは活動分布が均一に保たれ、抑制性相互作用が広範に拡散 することで活動の安定性が維持された。また、図14に示されるr値とz値の動的変化では、縦縞パ ターンにおいて収縮率が30%-50%に達するとz値が顕著に増大し、局所的な神経活動の振動が強 化されることが確認された。一方で、横縞パターンではz値の振動が抑えられ、収縮率に対して 安定した活動が維持された。このことから、縦縞パターンでは視覚的注意が収縮率の増加に応じ て動的に再分布され、錯視の強度が変動する一方で、横縞パターンでは錯視の形成が抑制される 傾向が示された。

以上の結果を総合すると、モデルシミュレーションにおいて縦縞パターンでは収縮率および刺激サイズの増加が局所的な抑制性相互作用を強化し、テキスト部分の神経活動が優位になること で視覚的注意が集中しやすいことが示された。一方、横縞パターンでは刺激サイズの増加に伴い、縞部分の支配が緩和され、注意が分散しやすくなることが明らかとなった。これらの知見 は、視覚野における方向性依存的な神経活動の特性が錯視形成に寄与していることを示唆してお り、縦方向と横方向で異なる計算原理が作用している可能性を示すものである。



図11. 縦縞消える錯視の背景収縮率と平均発火率の関係.



図12. 横縞消える錯視の背景収縮率ごとの平均発火率の関係.



図13. 縦縞消える錯視の背景収縮率と背景部分の発火率割合.テキスト収縮率と高コントラスト 刺激に対する文字領域の発火率割合の関係を表す。



図14. 横縞消える錯視の背景収縮率と背景部分の発火率割合. テキスト収縮率と高コントラスト 刺激に対する文字領域の発火率割合の関係を表す。



図15. 縦縞消える錯視の背景収縮率とrおよびz..式(5)および(6)で求めたrとzを収縮率ごと にまとめた結果。



図16. 横縞消える錯視の背景収縮率とrおよびz. 式(5)および(6)で求めたrとzを収縮率ごとに まとめた結果。

6. 考察と結論

本研究では、消える錯視の消失効果を一次視覚野(V1)における顕著性処理の観点から解析する ため、錯視を用いた知覚実験とV1モデルによるシミュレーションを実施した。以下に各結果に ついて詳細に議論する。

錯視を用いた知覚実験では、消える錯視の消失効果が観察距離に応じて強度を変えることを示 した。近距離(50cm)では顕著性が強化され、遠距離(100cm)では顕著性が減少する傾向が 観察された。この結果は、V1内の空間的解像度が距離に依存して変化することを示唆してい る。HubelとWiesel(1962,1977)の研究により、V1ニューロンの受容野サイズが空間的解像度 に影響を与えることが示されており、近距離では高い解像度によって細部の顕著性が強調される 一方、遠距離では解像度が低下し、錯視の効果が弱まる可能性が高い。また、これらの結果は、 視覚的顕著性が距離に応じて変動することを示したMurrayら(2006)の研究とも一致する。彼 らは、一次視覚野(V1)のニューロン活動が視覚的刺激の物理的特性だけでなく、観察条件に 応じて動的に調整されることを示している。この点は、V1顕著性仮説(Zhaoping,2002)を支持 するものであり、距離による顕著性マップの変化が消える錯視の基盤として機能している可能性 を示している。

開発したV1モデルのシミュレーションにおいて縦縞と横縞の刺激構造の比較から、顕著性形成 のメカニズムに顕著な違いがあることが示された。縦縞条件では、視覚的注意が局所的に集中す る一方、横縞条件では広範囲に分散する特性が観察された。この結果は、一次視覚野の方向選択 性ニューロンが刺激構造に応じた選択的応答を示すことを支持するものである(Livingstone & Hubel, 1988; Zeki, 1993)。特に、縦縞条件における局所的な顕著性の強化は、「同方向抑制

(iso-feature suppression)」という抑制メカニズムによって説明できる(Li, 1998)。この抑制効 果により、周囲のニューロン活動が抑制され、顕著な視覚特性を持つ領域が際立つ。一方、横縞 条件では抑制が広範囲に分散し、視覚的注意が均一化されるため、顕著性の集中度が低下する。 この現象は、KoeneとZhaoping(2007)の研究で示されたように、V1内のニューロン活動が視 覚的顕著性に基づいて特定の領域を選択するメカニズムと一致している。

刺激サイズおよび収縮率の調整により、顕著性形成が非線形的に変化することが確認された。 特に、縦縞条件では収縮率が中程度の場合に最大の顕著性が観察され、横縞条件では収縮率が増 加するにつれて顕著性が単調に減少する傾向が見られた。これらの結果は、刺激の空間的特徴が V1内の抑制性相互作用と興奮性相互作用に与える影響を反映している(Zhaoping, 2006)。縦縞 条件では、収縮率が中程度の際に抑制と興奮のバランスが最適化され、顕著性が最大化される。 この結果は、神経回路内のシナプス結合の調整が顕著性形成において重要な役割を果たすことを 示唆している(Li, 2001)。一方、横縞条件では広範な抑制性相互作用によって顕著性が均一化さ れ、収縮率が増加するにつれて顕著性が分散する傾向が見られる。この特性は、Howeら

(2006)が示した「足跡錯視(footsteps illusion)」における顕著性の分布変化と関連している可 能性がある。 以上の結果は、V1顕著性仮説を支持するとともに、視覚的注意の形成が一次視覚野内での抑 制性および興奮性相互作用に依存していることを示している。本研究は、一次視覚野における消 える錯視観察時の顕著性形成の神経基盤を明らかにし、視覚的注意や顕著性の動的メカニズムに 関する理解を深化させた。これにより、消える錯視の消失効果の神経学的基盤をより詳細に解明 するとともに、視覚認知における応用可能性を広げるための理論的枠組みを提供した。さらに、 これらの知見は、消える錯視が視覚情報処理の基盤的なメカニズムを解明するための有用なモデ ルであることを示唆している。今後の研究では、さらなるモデル改良や異なる条件下での実験を 通じて、V1内での顕著性マップ形成過程の詳細を明らかにすることが期待される。

7. 参考文献

Eagleman, D. M. (2001). *Visual illusions and neurobiology*. Nature Reviews Neuroscience, 2(12), 920-926.

Howe, P. D. L., Georgeson, M. A., & Freeman, T. C. A. (2006). *The footsteps illusion: A new visual illusion of motion without change of position*. Vision Research, 46(22), 3969-3972.

Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1962). *Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex.* Journal of Physiology, 160(1), 106-154.

Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1977). *Ferrier lecture: Functional architecture of macaque monkey visual cortex*. Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences, 198(1130), 1-59.

Kandel, E. R., Schwartz, J. H., & Jessell, T. M. (2000). *Principles of Neural Science* (4th ed.). McGraw-Hill.

Kersten, D., Mamassian, P., & Yuille, A. (2004). *Object perception as Bayesian inference*. Annual Review of Psychology, 55, 271-304.

Kitaoka, A., & Anstis, S. (2021). *A review of the footsteps illusion*. Journal of Illusion, 2, Article 5612.

Koene, A. R., & Zhaoping, L. (2007). *Feature-specific interactions in salience from combined feature contrasts: Evidence for a bottom-up saliency map in V1*. Journal of Vision, 7(7):6, 1-14.

Li, Z. (1998). *A neural model of contour integration in the primary visual cortex*. Neural Computation, 10(4), 903-940.

Li, Z. (1999). Visual segmentation by contextual influences via intracortical interactions in primary visual cortex. Network: Computation in Neural Systems, 10(2), 187-212.

Li, Z. (2001). Computational design and nonlinear dynamics of a recurrent network model of the primary visual cortex. Neural Computation, 13(8), 1749-1780.

Li, Z. (2002). *A saliency map in primary visual cortex*. Trends in Cognitive Sciences, 6(1), 9-16.

Livingstone, M. S., & Hubel, D. H. (1988). Segregation of form, color, movement, and depth: anatomy, physiology, and perception. Science, 240(4853), 740-749.

Murray, S. O., Boyaci, H., & Kersten, D. (2006). *The representation of perceived angular size in human primary visual cortex*. Nature Neuroscience, 9(3), 429-434.

Pashler, H., & Johnston, J. C. (1998). *Attentional limitations in dual-task performance*. In Attention (pp. 155-189). Psychology Press.

Peirce, J., et al. (2019). *PsychoPy2: Experiments in behavior made easy*. Behavior Research Methods, 51(1), 195-203. DOI: 10.3758/s13428-018-01193-y.

Purves, D., & Lotto, R. B. (2003). *Why we see what we do: An empirical theory of vision*. Sinauer Associates.

Wade, N. (1990). Visual allusions: Pictures of perception. London: Lawrence Erlbaum.Wade, N. J. (2017). Hidden images. In A. G. Shapiro & D. Todorović (Eds.), The Oxford

compendium of visual illusions (pp. 774-780). New York, NY: Oxford University Press.

Wolfe, J. M., Cave, K. R., & Franzel, S. L. (1989). *Guided search: an alternative to the feature integration model for visual search*. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 15(3), 419-433.

Zeki, S. (1993). A Vision of the Brain. Blackwell Science.

Zenger-Landolt, B., & Koch, C. (2001). *Flanker effects in peripheral contrast discrimination* — *psychophysics and modeling*. Vision Research, 41(27), 3663-3675.

Zhaoping, L. (2006). *Theoretical understanding of the early visual processes by data compression and data selection*. Network: Computation in Neural Systems, 17(4), 301-334.

Zhaoping, L. (2008). Attention capture by eye of origin singletons even without awareness – a hallmark of a bottom-up saliency map in the primary visual cortex. Journal of Vision, 8(5):1, 1-18.

8. 謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なご指導とご支援を賜りました指導教員のミケレットルジェロ 教授に深く感謝申し上げます。ミケレット先生の的確な助言と温かいご指導がなければ、本研究 をここまで進めることはできませんでした。

研究方針の策定から研究上の悩みに至るまで、親身に相談に乗ってくださった研究室OBの吉 田瞬良さんにも、心より感謝いたします。吉田さんの豊富な経験と的確なアドバイスが私の研究 を前進させる大きな力となりました。

また、毎週のゼミでの討論や研究に関するアドバイスを通して多くの刺激と学びを与えてくだ さった及川虎太郎さんをはじめとするミケレット研究室のメンバーの皆様にも、心よりお礼申し 上げます。皆様との意見交換は本研究に新たな視点をもたらし、研究を深化させる上で欠かせな いものでした。

最後に、これまで暖かく支えていただいた家族と友人へ心からの感謝を申し上げ、謝辞とさせ ていただきます。

河野 太陽

9. 発表実績

〈学会発表〉

- <u>河野太陽</u>, 吉田瞬良, Ruggero Micheletto, 動きをともなう消える錯視における視認性の測定, 日本視覚学会 2023 年夏季大会 (2023)
- 2. <u>河野太陽</u>, 吉田瞬良, Ruggero Micheletto, V1顕著性仮説に基づく消える錯視の神経基盤に関す る研究, *日本神経回路学会第34回全国大会 (2024)*