

脳波インタフェースの意思伝達性能向上に関する研究 —見え方が異なる同一模様に対する視覚誘発脳波の違い—

An improvement of communication performance in brain computer interface
—A difference of EEG for same visual stimulus in optical illusion—

板 井 陽 俊*

Akitoshi ITAI

吉 田 努**

Tsutomu YOSHIDA

はじめに

人間はさまざまな道具を発明し、それを利用することにより便利な暮らしを手に入れた。特に電子機器は社会の発展に大きく貢献しているが、これらの機器に人間の意思を伝達するにはヒューマンマシンインタフェース（HMI: Human Machine Interface）が欠かせない。代表的かつ多くの機器に利用される HMI には、パーソナルコンピュータへの入力であるキーボードやマウス、スマートホンやタブレットに組み込まれるタッチパネルなどが存在する。これらの HMI を通じて意思を入力するには、指など四肢の動きが必要とされる。その一方、身体の動きが制限される重度肢体不自由者にも対応可能であるインタフェースは、介助者の負担を減らしつつ Quality of Life を向上させる手段として大きく期待されている。その意思伝達媒体には、音

*情報工学科 — 知的信号処理

Department of Computer Science — Intelligent Signal Processing

**工学研究科 — 情報工学専攻

Graduate School, Engineering — Department of Computer Science

声、眼球運動など最小限の運動により発生する動きが利用されている [1]。さらに、身体が動かない状態においても脳機能が正常であれば利用可能な脳波も有力視されており、脳波を用いたインタフェースはBCI (Brain Computer Interface) と呼ばれ広く研究が進められている。既に運動や情景のイメージ、特定のアイコンを注視することにより発生する脳波を利用し、車いす制御や文字入力などを行うBCIが実用化されている [2] [3]。一方、2010年代に安価かつ容易に利用可能な脳波計が開発されたことを受け、BCIは重度肢体不自由者以外の人を対象としたインタフェースとしても応用先が広がり、医療、マーケティング、各種パフォーマンス向上に応用するブレインテックの一部に組み込まれつつある。

しかしながら、一般的なBCIによる外部機器操作を考えると、身体機能が正常とされる人にとっては、脳波から意思をくみ取りモノを動かす、あるいは言葉を伝えるより、身体を動かした方が手取り早い。これは、BCIに必要とされる、意思を反映した脳波の誘発、脳波計測、脳波解析と意思の判別、機器の操作、の4工程に時間がかかるためである。特にBCIにおける脳波は頭皮から計測されるため非常に微弱であり、いかに早くかつ明瞭な意思を反映させられるかが肝要となる。

ヒトの状態や意思を反映する脳波として、アルファ波に代表される周期的な律動脳波 [4]、映像や音などの印象的な刺激を受けたときに発生する事象関連電位などがある [5]。なかでも、周期的に点滅する視覚刺激（以降、フリッカ刺激）を注視したときに誘発される脳波であるSSVEP (Steady State Visually Evoked Potential) は、訓練が不要、かつ安定して計測されることから、BCIに利用者の意思を効率的に伝達する手段として注目されている [6]。SSVEPの誘発には白黒のチェッカーボードからなるフリッカ刺激が適しているとされている。しかし、なぜ適しているかは様々な模様を試行錯誤により検討した結果の産物であり、脳内情報処理と結び付けた明確な理由付けは達成されていない。そこで、SSVEPを誘発する人間の脳内機構を推測し、よりSSVEPを誘発するフリッカ刺激を知ることができれば、ブレインテックによる意思の伝達効率が向上し、重度肢体不自由者、非不自由者を問わず有益なBCIの実現に近づく。

SSVEP誘発量はフリッカ刺激の全体の明るさ（輝度）、フリッカ刺激自体のコントラスト、フリッカ刺激と背景色とのコントラストにより変化することが知られている [7] [8] [9]。一方、我々が認識する映像は視神経や脳内情報処理の影響により必ずしも物理的な色や明るさと一致しない。本研究では、錯視画像を利用し物理的に同じ画像であるが、異なるコントラストを持つ画像として認識されるフリッカ刺激を作成する。これらのフリッカ刺激により誘発されたSSVEPを比較し、SSVEPの誘発量が

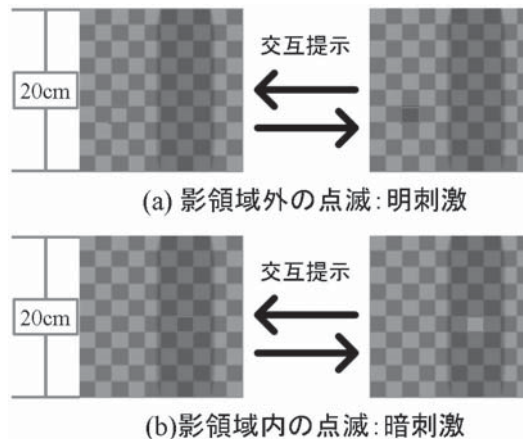
物理的点滅、もしくは脳の認識における点滅のどちらの影響を受けるかを示し、SSVEP 誘発に対する脳内情報処理の関与について言及する¹⁾。

1. フリッカ刺激

先述の通り SSVEP の誘発量は、フリッカ刺激のコントラスト（白黒比）、フリッカ刺激全体の明るさの影響を受ける。そのため、これらの物理量に差がなく、かつ異なるコントラスト、あるいは明るさとして認識される2つのフリッカ刺激を作成する必要がある。そこで、Edward により報告された同じ色が周囲の環境により異なる色に見えるチェッカーシャドウ錯視の原理を利用する[11]。チェッカーシャドウ錯視は、光源に照らされたチェッカーボードに光を阻害するオブジェクトを配置した明るい領域と暗い領域が近接して存在する絵により生じる。上記二つの領域は色分析上同じ色のマスを持つが、配置された領域により異なる色に見える。これは脳がマスの色を個別に認識することなく、周辺領域とのコントラストと、全体がチェッカーボードであるという認識を優先することに起因する。この原理を利用し、明るい領域と暗い領域において物理的に同じ明るさのマス点を点滅させるフリッカ刺激を作成する。

作成された2つのフリッカ刺激を図1に示す。これらのフリッカ刺激に利用されている色の諸元を表1に示す。影領域外の暗いマスと影領域内の明るいマスは同じ色である。したがって、図1(a)、(b)左図の太い四角に囲まれた影領域外の明るいマス

図1：フリッカ刺激



1) 本稿は、技術報告[10]の発表後に報告された新たな知見を加え、[10]の成果を解釈しなおしたものである。

表 1：フリッカ刺激諸元

	RGB 値	
	影領域外	影領域内
明るいマス	[164, 167, 165]	[123, 126, 124]
暗いマス	[123, 126, 124]	[92, 95, 93]

と影領域内の暗いマスは、上下左右が同じ色である。これらの四角に囲まれたマスを同じ色により点滅させる。具体的には、両領域において影領域外の明るいマスと影領域内の暗いマスを交互に表示させる。本研究では、影領域外が点滅する刺激を明刺激、影領域内が点滅する刺激を暗刺激と呼ぶ。

2. 脳波計測

脳波計測諸元を表 2 に示す。フリッカ刺激以外の光や音による影響を避けるため、実験は暗室内において行われる。被験者は電極部を生理食塩水により湿潤させた脳波計を装着し、椅子に座り、あご乗せ台に頭部を固定される。フリッカ刺激は被験者の鼻頭から 60 cm の位置に設置された 27 インチ FullHD 解像度のディスプレイを通して提示される。被験者には図 1 のフリッカ刺激のうち 1 つがランダム順に提示され、点滅する 1 つのマスを視線と注意を向けるよう指示が与えられる。視線の向きや刺激までの距離の違いによる影響を避けるため、点滅するマスは被験者の正面にくるよう、計測のたびに位置調整がなされる。なお、ディスプレイ上の刺激以外の余白には、RGB 値 [128, 128, 128] の灰色が表示される。また、被験者は正常な視力を有する健康な成人より選定される。

表 2：脳波計測諸元

脳波計	EMOTIV 社 EPOC+
標本化周波数	128 Hz
バンドパス	0.2 – 45.0 Hz
被験者	男性 3 名（平均 22 歳）
点滅周波数	15 Hz
計測時間	60 秒
計測回数	5 回

3. データ解析

本研究では SSVEP 誘発量と誘発率による解析を行う。SSVEP 誘発量は 60 秒間の脳波データに離散フーリエ変換を適用して得られた振幅スペクトルのうち、15 Hz 成分の量とする。これは、SSVEP は点滅刺激と同じ周波数に現れる脳波変動であることに起因する。誘発率は閾値処理による外れ値検知に基づき計算される。はじめに、各被験者平常時の脳波を計測し、15 Hz 成分の平均値 μ と標準偏差 σ より閾値 $\mu + 3\sigma$ を求める。閾値より SSVEP 誘発量が大きい場合を誘発有、小さい場合を誘発無とし、誘発有の数を計測回数で除することにより誘発率を得る。脳波は EPOC+ により頭皮上の 14 か所において計測可能であるが、そのうち SSVEP が誘発されやすい後頭葉を選定、さらにより多くの被験者、計測回において SSVEP の誘発量が見られた国際 10-20 法における右後頭部を表す O2 より得られたデータのみ解析対象とする。

4. 誘発率

明刺激、暗刺激における SSVEP 誘発状況を表 3、4 に示す。○は誘発有、×は誘発無を表す。両表より、明刺激では全データに SSVEP の誘発が見られる。しかし、暗刺激の誘発率は 67% であり、特に被験者 B では 1 回目以降誘発されていない。以上

表 3：明刺激の誘発状況（100%）

	試行回				
被験者	1	2	3	4	5
A	○	○	○	○	○
B	○	○	○	○	○
C	○	○	○	○	○

表 4：暗刺激の誘発状況（67%）

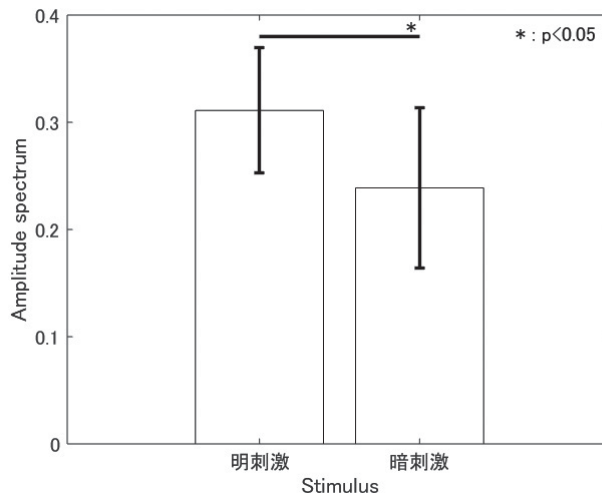
	試行回				
被験者	1	2	3	4	5
A	○	○	○	×	○
B	○	×	×	×	×
C	○	○	○	×	○

より、明刺激は暗刺激に比べ SSVEP が誘発されやすいことがわかる。

5. 誘発量

刺激別に SSVEP 誘発量を平均した結果を図 2 に示す。エラーバーは標準偏差を表す。この図より、誘発量の視点においても SSVEP は明刺激の方が誘発されやすい。また、2 つの刺激間における統計的な差を検証するため t 検定を適用した。その結果、有意水準 0.05 において有意差が検出された。

図 2：明刺激，暗刺激による SSVEP 誘発量 (n=15)



6. 考察

明刺激と暗刺激は物理的に同じ光であるため、本来は同じ強さの SSVEP が誘発されるはずである。しかし、本研究の成果より SSVEP の誘発率、誘発量の側面から異なる誘発量が得られた。これは、人間の脳において異なる明るさもしくはコントラストのフリッカ刺激であると認識され、SSVEP 誘発量に差が現れたものと考えられる。以上より、SSVEP の誘発量は物理的な光のみならず、脳が認識した錯視の影響を受け変化することがわかる。

7. まとめ

本研究では SSVEP 誘発に対する脳の情報処理機構の関与を示すため、物理的には同じであるが、人には異なる明るさとして認識されるフリッカ刺激を作成し、SSVEP 誘発実験を行った。その結果、SSVEP は脳が認識するフリッカ刺激の影響を受け変化することを示した。

一方、これらの結果から SSVEP と脳の情報処理機構が関与しているか判断するには、フリッカ刺激に対する認識の違いがどの過程において発生したかが論点となる。従来、錯視は脳の情報処理機構が関与していると考えられているが、発生原因が解明されておらず仮説による説明にとどまるものも少なくはない。例えばカニツァの三角形 [12] は過去に学習した既知の形状を当てはめ、欠落した情報を補填しているため生じると言われている。その一方で、エニグマ錯視は微小かつ速い眼球運動であるマイクロサッカードの関与が明らかにされている [13]。2020 年、Sinhaa らは明るさの対比により生じる錯視の根源である側抑制の一部は、脳の情報処理機構ではなく、脳に視覚情報が到達する前から生じている可能性を示唆した [14]。この成果は、今回生じた SSVEP 誘発量の差を決定するフリッカ刺激の明るさやコントラストの差は、脳内情報処理に到達する以前の網膜あるいはその神経伝達電位の時点から発生していた可能性が排除できないことを示唆する。一方、チェッカーシャドウ刺激には影部分であるという認識が関与している可能性について言及されており、脳との関連を完全には排除できない。以上の議論より、SSVEP 誘発に対する脳内情報処理の関与は否定されないが、今回の実験結果に現れた SSVEP 誘発量の差は網膜や神経伝達上に発生した可能性が高いと考えられる。

今後、異なるフリッカ刺激を利用し、さらなる脳内情報処理と SSVEP 誘発の関連を明らかにする必要がある。

[参考文献]

- [1] 久野悦章, 八木透, 藤井一幸, 古賀一男, 内川嘉樹: EOG を用いた視線入力インタフェースの開発, 情報処理学会論文誌, vol. 39, no. 5, pp. 1455-1462, 1998.
- [2] J. R. Wolpaw, N. Birbaumer, D. J. McFarland, G. Pfurtscheller, and T. M. Vaughan: Brain computer interfaces for communication and control, Clinical Neurophysiology, vol. 113, no. 6, pp. 767-791, 2002.
- [3] M. A. Lebedev, and M. A. L. Nicolelis: Brain machine interfaces: past, present and future, Trends in Neurosciences, vol. 29, no. 9, pp. 536-546, 2006.

- [4] 飛松省三：ここが知りたい！臨床神経生理，中外医学社，pp. 1-3, 2016.
- [5] A. Clark: Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science, Behavioral and Brain Sciences, vol. 36, no. 3, pp. 181-204, 2013.
- [6] D. Regan: Steady-state evoked potentials, Journal of the Optical Society of America, vol. 67, no. 11, pp. 1475-1489, 1977.
- [7] 飛松省三：誘発電位解釈のポイント，九州大学大学院医学研究院脳研臨床神経生理，pp. 12-13, 2006.
- [8] 飛松省三：視覚誘発電位の最近の進歩 2. VEP の正常波形と臨床応用，臨床脳波，38 卷 11 号，pp. 784-786, 1996.
- [9] 北沢大樹，松本倫徳，板井陽俊：瞳孔径が SSVEP 誘発量に与える影響，情報学ワークショップ，P224, 2019.
- [10] 吉田努，長縄拓磨，板井陽俊：同コントラストの視覚刺激による誘発脳波の違い，電子情報通信学会技術報告，vol. 120, no. 176, pp. 71-74, 2020.
- [11] E. H. Adelson: Perceptual Science Group @ MIT,
<http://persci.mit.edu/gallery/checkershadow/> (accessed 2020-1-8).
- [12] G. Kanizsa: Margini quasi-percettivi in campi con stimolazione omogenea, Rivista di Psicologia, vol. 49, no. 1, pp. 7-30, 1955.
- [13] X. G. Troncoso, S. L. Macknik, J. O. Millan, and S. M. Conde: Microsaccades drive illusory motion in the Enigma illusion, Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 105, no. 41, pp. 16033-16038, 2008.
- [14] P. Sinha, S. Crucillab, T. Gandhic, D. Rosed, A. Singhe, S. Ganeshf, U. Mathurf, and P. Bexd: Mechanisms underlying simultaneous brightness contrast: Early and innate, Vision Research, vol. 173, pp. 41-49, 2020.