

周期閃光刺激に対する意識の持ち方による誘発脳波の変化と意思表示への応用

Impact of Focusing Attention on Periodic Flicker Stimuli on Steady-State Visually Evoked Potential and Application to Manifestation of Intention

○ 西藤聖二 (山口大) 石津義丈 (山口大) 田中正吾 (山口大)

Seiji NISHIFUJI, Yoshitake ISHIZU and Shogo TANAKA, Yamaguchi University

Abstract: The present study investigated the effect of focusing attention on repetitive flicker stimuli on the amplitude of steady-state visually evoked potential (SSVEP) for the purpose of developing a novel brain machine interface (BMI) with eyes-closed for heavily wholly-paralyzed disabilities who could not control their eye-movement. The grand mean of the amplitude of the SSVEP across 16 healthy subjects was decreased by more than 20 % in the focusing attention over the entire scalp under the condition of the flickering frequency of 10 Hz and also decreased by as much as 20 % in the two occipital lobes and parietal region under the condition of the flickering frequency of 14 Hz. This result indicates the possibility of the novel BMI which is available under the eyes-closed condition in terms of controlling focusing attention to the flicker stimuli.

Key Words: Brain Machine Interface, Brain Computer Interface, Steady-State Visually Evoked Potential, Eyes-Closed Condition

1. はじめに

現在、世界中の多くの研究機関において、脳波のみを用いたコミュニケーション手段である Brain Machine Interface (BMI) (または Brain Computer Interface; BCI) の研究が行われている。最近では、BMI は、本来の目的である重度身体障害者のコミュニケーション手段に留まらず、ゲームや家電機器の操作など、多岐に渡る応用が期待されている。すでに脳波を利用していると謳った意思表示装置やゲームが商品として発売されているが、多くの場合、実用性や信頼性には疑問符を付けざるを得ないが現状である。

従来、BCI で検出・解析対象としてきた脳波の代表的な成分としては、運動準備や運動イメージによって誘発される μ リズムや、認知活動に伴って発生する P300 や N100、運動や認知活動により中心部に生じる頭皮上緩変動電位 (Slow Cortical Potential) などが挙げられる⁽¹⁻⁶⁾。ただし、これらの脳波成分は、信号の強度や持続性に欠点があり、信号対雑音比の観点から BCI の誤判定につながる可能性が小さくない。意思判定に要する時間についても、特に SCP では計測時間が 20 秒程度必要であり、情報転送速度の点で難がある。従って、上記の脳波成分を用いた BCI については、実用上、精度と応答性の点で解決すべき課題が残っている。

我々は、周期的なフリッカー光刺激を与えた時に現れる、刺激周波数に同調する脳波成分 (定常状態視覚誘発電位; Steady-State Visually Evoked Potential、以下 SSVEP と呼ぶ) に注目している⁽⁷⁻⁸⁾。SSVEP の振幅は、刺激周波数が (安静時の主要背景脳波である) α 波の周波数帯域 (8-13 Hz) 内の 10 Hz や、その倍調波に相当する 20 Hz 付近の時に大きくなり、 α 波の振幅を超える場合もある。さらに持続性も数秒以上であり、上記の P300 等に長じている。

従来、この SSVEP の利点を生かして様々な BCI (SSVEP-BCI) が研究開発されてきた⁽⁹⁻¹³⁾。これらの SSVEP-BCI では、意思表示に際して、利用者が空間的に配置された複数のアイコン (チェッカーボックスや文字、絵など) の内、一つを選んで凝視する。各アイコンは異なる周波数で点滅しており、利用者の脳波には、凝視した周波数と同調する SSVEP の振幅が増加することから、利用者の意思を推定する仕組みになっている。このシステムでは、

利用者が開眼して視線方向を自らの意思で制御できることが必要である。視線移動が難しい場合の対策 (アイコンの重ね合わせ等による対応) も提案されている⁽¹¹⁻¹²⁾が、進化した筋萎縮性側索硬化症患者などのように、目の開閉自体が困難な場合は想定されていない。そもそも視線移動が可能であれば、脳波を用いなくても、視線を追跡することによって意思を表現できるシステムの利用が可能であり、この点では SSVEP-BCI の利点はさほど大きいとは言えない。

以上の観点から、目の開閉が困難な場合であっても他者に意思を伝えることができる SSVEP-BCI が必要である。我々は、昨年の本学会において、閉眼状態における SSVEP の振幅が、フリッカー刺激に対する意識集中によって減少することを報告した⁽¹⁴⁾。刺激への意識集中の制御は眼球の移動を必要としないので、この現象を利用することによって、閉眼状態でも Yes / No の意思表示が可能で 2 進 SSVEP-BCI の可能性があると期待される。ただし、現象の再現性や個人差・部位差についての考察が十分ではなく、さらに刺激周波数が 10 Hz の場合のみの報告に留まっていた。そこで、本研究では、これらの事項について検討を進め、意識の持ち方による SSVEP の変化に関しての知見をまとめたので、報告する。

2. 方法

2-1 測定

本研究では、健常者 16 名 (21~44 歳、男性) の協力を得て、山口大学産学公連携センターの電磁シールドルームで脳波を測定した。電極位置は Fig. 1 に示す国際 10-20 電極配置法に従って頭部 13 部位 (Fp1、Fp2、F3、Fz、F4、C3、Cz、C4、P3、Pz、P4、O1、O2) とし、両耳朶 A1、A2 を連結して基準電極にした単極導出法によって覚醒閉眼時の脳波を導出した。さらに左右のこめかみの横 (体側側) より眼振図を導出した。導出した信号は脳波計 (日本光電製 EEG-5532、ゲイン 86dB、時定数 0.3 s) で増幅した後、パソコン (NEC PC9821Xc16) の制御下でサンプリング周波数 200 Hz/ch、分解能 12 ビットで離散値化した。実験に際しては、ヘルシンキ宣言の主旨に則って事前に被験者に実験の内容を書面と口頭にて説明し、同意の署名を得た。

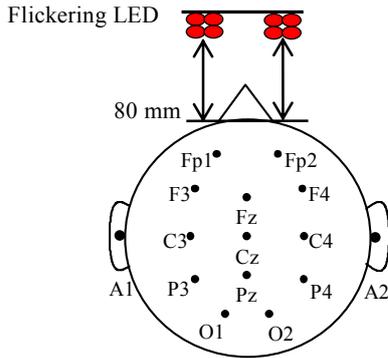


Fig.1 Electrode arrangement (10-20 system, top view)

閃光刺激には、計 8 個の赤色発光ダイオード (Light Emitting Diode, LED) (OptoSupply, OSHR516A-QR、半値角 30 deg、波長 625 nm) を Fig. 1 に示すように左右に縦横 2 列 (4 個) ずつ配置したボードを用い、被験者の眼前約 80 mm の位置でこれらの LED を同期点滅させた。刺激強度は、照度計 (トプコン IM-5) の照度指示値が被験者の目の位置で 5 lx に設定した。刺激測定においては、閉眼状態の各被験者に、LED の点滅が臉を通して十分に認知でき、気分を害するほどのまぶしさを感じない程度であることを確認した。

閃光刺激の周波数は 10 Hz と 14 Hz を用いた。前者は 1. はじめにで既述したように、比較的大きな振幅の SSVEP の出現が期待できる周波数として選択した。一方で、この刺激周波数条件で誘発される SSVEP は、 α 波の 10 Hz の成分と分離できない。そこで、覚醒閉眼時には強く表れることの脳波成分の周波数である後 (14 Hz) も刺激周波数に選んだ。

刺激実験は各試行 20 s の長さで、Table 1 に示すように、4 試行ごとに刺激周波数を 10 Hz と 14 Hz で交互に切り替えた。各 4 試行の内、最初の 2 試行では被験者に刺激に対する意識を「漫然と受け止める (意識非集中)」ように、次の 2 試行では「強く意識する (意識集中)」ように、それぞれ指示した。Table 1 のように全 16 試行を行ったが、前半の 8 試行を刺激に慣れるための準備試行として、後半の 8 試行 ($i = 9 \sim 16$) を本試行として解析対象とした。

なお、「閃光刺激への意識集中」については、上述したように、被験者には閃光刺激の点滅が臉の裏側全体にわたって広がるため、開眼状態で用いる従来の SSVEP-BCI と様相が異なる。すなわち、「意識集中」は、「光源への視線移動」ではないことに注意する必要がある。実際に本研究では、閃光刺激への意識集中時においても、刺激に対する方向性を持った変化を示すような特徴的な眼球運動は、どの被験者からも認められなかった。

Table 1 Stimulus conditions

(C: Concentration on flicker stimuli, NC: Non-concentration)

Trial i	Frequency (Hz)	State	Data status
1, 2	10	NC	Test
3, 4	10	C	Test
5, 6	14	NC	Test
7, 8	14	C	Test
9, 10	10	NC	Analyzed
11, 12	10	C	Analyzed
13, 14	14	NC	Analyzed
15, 16	14	C	Analyzed

2-2 解析

前節の方法で離散化して取得した脳波データより、SSVEP を抽出するために離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform, DFT) して、得られた振幅スペクトルから、SSVEP の基本波 (刺激周波数と一致する波) の振幅を推定した。離散フーリエ変換に用いた脳波は、各試行で刺激開始直後の過渡応答を含む最初の 3 s 間と刺激に対する応答が弱まるのが予想される後半の一部を除いた、測定開始後 3 s から 13 s 後までの 10 s 間のデータである。

次に、推定した SSVEP 振幅を用いて、閃光刺激への意識集中による SSVEP への影響を評価するために、次の SSVEP の平均振幅比 (SSVEP 振幅比と呼ぶ) を用いた。

$$R = \frac{\frac{1}{2}(A_{c1} + A_{c2})}{\frac{1}{2}(A_{n1} + A_{n2})} \quad \text{--- (1)}$$

ここで A_{cj} と A_{nj} ($j = 1, 2$) は、それぞれ刺激周波数 f [Hz] の条件下での意識集中及び非集中課題実行時の第 cj , nj 試行における (刺激周波数と一致する) SSVEP 振幅であり、Table 1 の試行番号では、 $f = 10$ [Hz] の場合、 $c1 = 11$, $c2 = 12$, $n1 = 9$, $n2 = 10$ に対応し、 $f = 14$ [Hz] では、 $c1 = 15$, $c2 = 16$, $n1 = 13$, $n2 = 14$ である。すなわち、(1) 式の SSVEP 振幅比は、それぞれの刺激周波数条件で、意識非集中時 2 試行に対する意識集中時 2 試行の各 SSVEP 振幅平均の割合を示している。

さらに、各刺激条件 (同一刺激周波数) 下で実施した 4 回の試行 (意識非集中及び意識集中課題各 2 回) の SSVEP 振幅を正規化して、各刺激条件 (4 試行) 内における試行ごとの振幅の変化を調べた。

$$\bar{A}_i = \frac{A_i}{A_{n1} + A_{n2} + A_{c1} + A_{c2}} \quad \text{--- (2)}$$

ここで、 \bar{A}_i は正規化された SSVEP 振幅 (正規化振幅) であり、 A_i は Table 1 の第 i 試行における SSVEP 振幅で、 $f = 10$ [Hz] の場合は $i = 9, \dots, 12$, $f = 14$ [Hz] の場合は $i = 13, \dots, 16$ であり、 cj, nj ($j = 1, 2$) の値は (1) 式の場合と同様に f の値に応じる。(2) 式によって求められた SSVEP の正規化振幅は、各刺激周波数条件において、刺激に対する非集中と集中を 2 回ずつ繰り返すことによる SSVEP 振幅の相対的な大きさの変化を評価するために用いた。すなわち、正規化振幅を用いて、刺激に対する応答の再現性を調べた。

3. 結果

3-1 意識の持ち方による SSVEP 振幅への影響

Fig. 2, 3 に 10 Hz 及び 14 Hz 刺激時における右半球上 5 部位 (Fp2, F4, C4, P4, O2) について、SSVEP 振幅比 R の被験者平均 (16 名) を標準誤差と共に示す。10 Hz 刺激時の Fig. 1 では、右半球上のいずれの部位においても被験者平均が 1 を下回っている。すなわち、10 Hz 閃光刺激に対する意識集中によって SSVEP 振幅が減少する傾向があることがわかる。特に、Fp2 を除く F4, C4, P4, O2 の 4 部位において振幅比 R の平均値は 0.7 以下となっており、意識集中時による影響が大きい。あわせてこれらの部位では Fp2 よりも標準誤差が小さくなっており、個人によるばらつきもやや小さい。

同様の結果は、左半球上の 5 部位 (Fp1, F3, C3, P3, O1) および正中線上の 3 部位 (Fz, Cz, Pz) でも得られており、中でも C3, P3, O1, Cz, Pz において、振幅比 R の平均値は 0.7

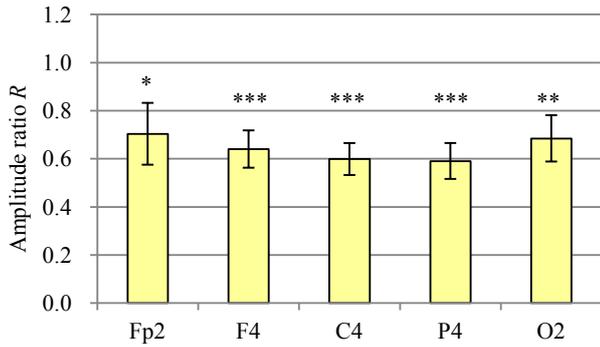


Fig. 2 Grand mean of amplitude ratio R with standard error across 16 subjects under 10 Hz stimuli. The symbols *, ** and *** designate $p < 0.05$, $p < 0.01$ and $p < 0.001$ using the independent one-sample t -test for population mean of R with the hypothetical mean $\mu_R = 1$, respectively.

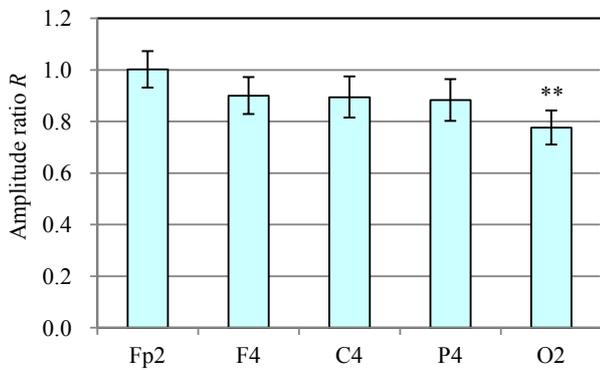


Fig. 3 Grand mean of amplitude ratio R with standard error across 16 subjects under 14 Hz stimuli. The symbols *, ** and *** designate the same meanings as Fig. 2.

未満を示した。このように、意識集中による SSVEP の振幅変化は、頭部の中心～後方 (C3, C4, P3, P4, Pz, O1, O2) において、より大きく表れた。

参考までに SSVEP 振幅比 R について母平均の 1 標本 t 検定 (帰無仮説 $\mu_R = 1$) を行ったところ、右半球では全部位に、左半球では C3 から O1 までの領域に、正中線上上では Fz, Pz において有意差が認められた (F4, C4, P4, O1 で $p < 0.001$ 、O2, C3, P3, Fz, Pz で $p < 0.01$ 、Fp2 で $p < 0.05$)。

一方、Fig. 3 に示す 14 Hz 刺激の場合、10 Hz 刺激の場合に比べて SSVEP 振幅比が大きな値 (部位により 0.78~1.0) を示している。O2 では SSVEP 振幅比 R の被験者平均が比較的小さく (0.78)、10 Hz 刺激と同様の応答が見られているが、他の部位では意識集中による SSVEP 振幅の変化が不明瞭である。左半球及び正中線上上においても、10 Hz 刺激時と異なり、意識集中によって 20% 程度の SSVEP の振幅変化が見られる領域は P3 (R の被験者平均 0.76) と O1 (同 0.81) のみで、後頭部及び頭頂部に局在している。この原因として、14 Hz 刺激時の SSVEP 振幅が 10 Hz 刺激時と比べて各部位の被験者平均にして約 40% 小さいため、自発脳波及びその変動の影響を受けやすいことが挙げられる。ただし、前述の 3 部位 (O2, P3, O1) では Fig. 1 と同様に、振幅比 R について、母平均の 1 標本 t 検定によって有意差

が認められた (O2, C3 で $p < 0.01$ 、O1 で $p < 0.05$)。

3-2 意識の影響の再現性

Fig. 4, 5 に刺激周波数 10 Hz と 14 Hz の各条件で (2) 式より求めた SSVEP の正規化振幅 \bar{A}_i の被験者平均を標準誤差と共に示す (部位は右後頭部 O2)。いずれの図においても、SSVEP の正規化振幅は、意識非集中時 (NC1、NC2) に比べて意識集中時 (C1、C2) で減少している。さらに、意識非集中時の 2 試行及び意識集中時の 2 試行の各試行の間 (NC1-NC2 間及び C1-C2 間) には大きな振幅差が見られていない。従って、意識非集中・集中の間には SSVEP 振幅の大小関係が存在し、さらに意識集中による SSVEP への効果には、一定程度の再現性があると判断できる。

そこで、刺激に対する意識 (非集中・集中) の要因と、各意識状態の試行回 (非集中・集中各々で 1 回目、2 回目) の要因の 2 要因について、反復測定 2 元配置分散分析を行ったところ、意識 (非集中・集中) の違いによって有意差が認められ ($F(1, 60) = 19.6, p = 4.1 \times 10^{-5} < 0.001$)、一方、試行回の違いでは有意差が認められなかった ($F(1, 60) = 2.57, p = 0.11 > 0.05$)。また、交互作用も認められなかった ($F(1, 60) = 2.1 \times 10^{-3}, p = 0.68 > 0.05$)。

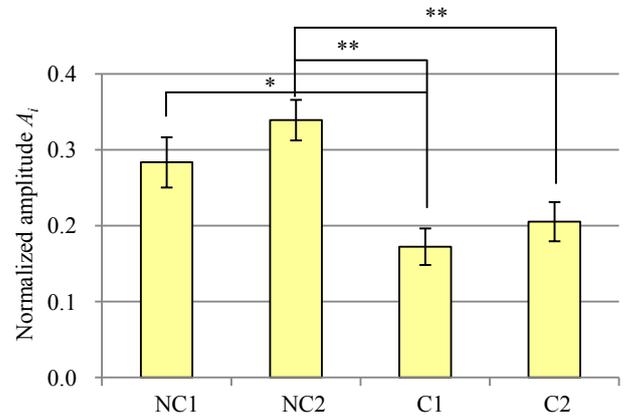


Fig. 4 Mean of normalized SSVEP amplitude with standard error under the stimulus frequency of 10 Hz across 16 subjects. The symbols * and ** designate $p < 0.05$ and $p < 0.01$ for two-tailed paired t -test as *Post-hoc* test. NC1, NC2: non-concentration, C1, C2: concentration on flicker stimuli.

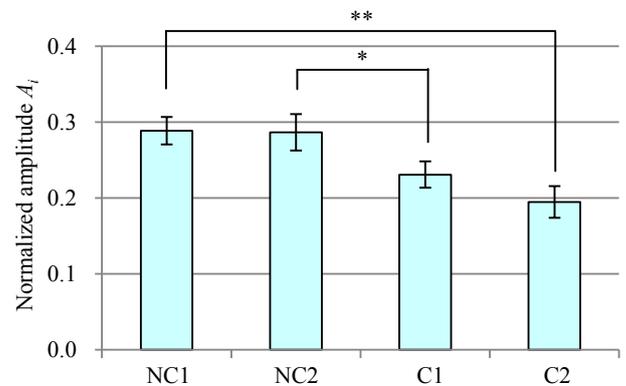


Fig. 5 Mean of normalized SSVEP amplitude with standard error under 14 Hz stimuli across 16 subjects. The meanings of "NC1", "NC2", "C1" and "C2" and symbols * and ** are the same as Fig. 4.

さらに、意識要因に関しては、*Post-hoc test* として対応のある *t* 検定を用いて多重比較を行った。その結果、有意差が認められた組み合わせについて Fig. 4 に *, ** で示す。すなわち、非集中 1 回目 (NC1) と集中 1 回目 (C1)、非集中 2 回目 (NC2) と C1 及び NC2 と集中 2 回目 (C2) の 3 つの組み合わせで有意差が認められた。ただし、非集中条件 (NC1, NC2)、集中条件 (C1, C2) のどちらにおいても、1 回目よりも 2 回目の試行で SSVEP 振幅が増加していることもあり、NC1 と C2 の SSVEP 正規化振幅の間には有意差がみられない。従って、繰り返し回数が増加すると再現性が低下する恐れがあり、今後、集中と非集中を多数回繰り返したときの再現性を検証していく必要がある。

一方、刺激周波数 14 Hz の場合 (Fig. 5) には、意識非集中時と集中時の SSVEP 正規化振幅の差は 10 Hz 刺激時より若干小さいが、上記と同様の分散分析により、意識 (非集中・集中) の違いによる有意差が認められた ($F(1, 60) = 13.6, p = 4.8 \times 10^{-4} < 0.001$)。試行回の違いや交互作用に関しては有意差が認められなかった (それぞれ $F(1, 60) = 0.89, p = 0.35$ および $F(1, 60) = 0.71, p = 0.40$)。また、多重比較によって有意差の見られた意識条件の組み合わせは NC1 と C2、NC2 と C1 であり、10 Hz 刺激の場合よりも減っている。一方、14 Hz 刺激時では 10 Hz 刺激時と異なり、非集中試行では 1 回目と 2 回目でほとんど変化がなく、集中試行では 2 回目の方が 1 回目よりも振幅が減少していた。したがって、この刺激条件の場合、刺激を繰り返すことによる慣れの効果が 10 Hz 刺激の場合よりも小さいとも考えられるため、今後もこの刺激周波数での SSVEP の応答を調査する意義はあると思われる。

閃光刺激への意識集中に伴う SSVEP の変化を考える上で留意すべきことは、従来の SSVEP-BCI と異なり閉眼状態で用いるため、刺激を意識しても網膜に入る刺激の量が増加するとは限らないということである。本研究において、意識集中による SSVEP の応答には刺激周波数依存性や部位差が見られたが、Fig. 2, 3 に示したように、被験者平均では SSVEP 振幅が減少する傾向が強かった。被験者個々の応答に注目すると、例えば右後頭部 O2 では、被験者 16 名中、10 Hz 刺激下で意識非集中時から集中によって 20 % 以上振幅が減少した被験者が 11 名いたのに対して、20 % 以上増加した被験者は 2 名、増減が ± 20 % 以内に留まった者が 3 名であった。また、14 Hz 刺激の場合はそれぞれ 10 名、1 名、5 名であった。

このように、刺激集中により、むしろ SSVEP が抑制される被験者が多いことは、そもそも意識集中が脳波に与える影響のメカニズムが従来の SSVEP-BCI と異なると考えざるを得ない。一つの可能性として、刺激への意識集中の指示により、被験者が緊張状態に陥り、精神作業時の α 波に生じる事象関連脱同期に似た現象が SSVEP に現れたのではないかと推察される。ただし、SSVEP の応答には少なからぬ部位差・個人差が存在し、この原因として「意識集中」が使用者によって異なる受け取り方をされていることがありと思われる。早急に意識集中の定義及び意識を集中させる具体的な方法を確立していきたい。

4. おわりに

閉眼状態で使用可能な SSVEP-BCI を開発することを狙い、本研究では、閃光刺激への意識集中に伴う SSVEP の変化について調べた。その結果、SSVEP の振幅は、閃光刺激への意識集中に伴い、刺激周波数 10 Hz の場合は頭部のほぼ全体で、14 Hz の場合は左右後頭部及び左頭頂部にお

いて、有意な変化を示した。この結果は、閉眼で使用可能な SSVEP-BCI の実現可能性を示唆している。今後は意識集中の指示の方法および意識集中時の SSVEP 振幅の変化が安定して再現される条件の探索を中心に検討を進める。

参考文献

- (1) J. R. Wolpaw, D. J. McFarland, G. W. Neat and C. A. Forneris, An EEG-based brain-computer interface for cursor control, *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, vol.78, pp. 252-259, 1991.
- (2) L. A. Farewell and E. Donchin, Taking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials, *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, vol. 70, pp. 512-523, 1988.
- (3) A. Kubler, et al., The thought translation device: a neurophysiological approach to communication in total motor paralysis, *Exp. Brain Res.*, vol. 124, pp. 223-232, 1999.
- (4) A. Kubler and N. Birbaumer, Brain-computer interfaces and communication in paralysis: Extinction of goal directed thinking in completely paralysed patients?, *Clin. Neurophysiol.*, vol. 119, pp. 2658-2666, 2008.
- (5) D. S. Tan and A. Nijholt (eds.), *Brain-Computer Interfaces Applying our Minds to Human-Computer Interaction*, London, Springer, 2010.
- (6) B. Graitmann, B. Allison and G. Pfurtscheller (eds.), *Brain-Computer Interfaces*, Berlin Heidelberg, Springer, 2010.
- (7) D. Regan, Recent advances in electrical recording from the brain, *Nature*, vol. 253, pp. 401-407, 1975.
- (8) R. B. Silberstein, Steady-state visually evoked potentials, brain resonance, and cognitive processes, P. L. Nunez (ed.) *Neocortical Dynamics and EEG Rhythms*, New York: Oxford University Press, pp. 272-303, 1995.
- (9) E. Sutter, The brain response interface: communication through visually-induced electrical brain responses, *J. Microcomput. Appl.*, vol. 15, pp. 31-45, 1992.
- (10) M. Middendorf, G. McMillan, G. Calhoun and K. S. Jones, Brain-computer interfaces based on the steady-state visual-evoked response, *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 211-214, 2000.
- (11) G. R. Muller-Putz, R. Scherer, C. Brauneis and G. Pfurtscheller, Steady-state visual evoked potential (SSVEP)-based communication: impact of harmonic frequency components, *J. Neural Eng.*, vol. 2, pp. 123-130, 2005.
- (12) B. Z. Allison, D. J. McFarland, G. Schalk, S. D. Zheng, M. M. Jackson, and J. R. Wolpaw, Towards an independent brain-computer interface using steady state visual evoked potentials, *Clin. Neurophysiol.*, vol. 119, pp. 399-408, 2008.
- (13) M. A. Lopez-Gordo, A. Prieto, F. Pelayo and C. Morillas, Customized stimulation enhances performances of independent binary SSVEP-BCIs, *Clin. Neurophysiol.*, vol. 122, pp.128-133, 2011.
- (14) 西藤聖二, 黒田隆彦, 田中正吾, 光刺激への意識による脳波の変化を用いた意思の計測, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2011, pp. OS-2-3-1 -OS-2-3-4, 2011.