原著論文

定常状態視覚誘発電位による複数移動対象への注意状態の推定

新海 崇紘, 南 哲人, 中内 茂樹

豊橋技術科学大学

Estimation of the Tracking States of Multiple Moving Targets by Steady State Visual Evoked Potential

Takahiro SHINKAI, Tetsuto MINAMI and Shigeki NAKAUCHI

Toyohashi University of technology, 1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi, 441-8580, Japan

Abstract : In daily life, we can attend to multiple moving objects. For example, the drivers always pay attention to pedestrians, cars and so on while driving a car. Attention to multiple moving targets is an essential ability of visual system. Extracting information to which the driver pays attention may allow us to prevent the accidents caused by lack of attention. To investigate attentional status to multiple moving objects, steady state visual evoked potential (SSVEP) elicited by these stimuli when participants were instructed to track two moving targets among three. The results showed that SSVEP amplitudes differed depending on attentional states, meaning that it is possible to extract attentional states to multiple moving targets using SSVEPs. Future studies include estimation of the level of the subject's concentration to multiple moving targets using SSVEPs.

Keywords : *visual attention, multiple object tracking, SSVEP*

1. は じ め に

人間は、視界に映る複数の移動物体を同時に捉えることができる。例えば、車を運転中のドライバーは常に歩行者や前方車など様々なものに注意を向けている。こういった状況でドライバーがどこに注意を向けているかという情報を抽出することでできれば、注意不足による事故を未然に防ぐことができるかもしれない。

人の注意状態を抽出する方法として、定常状態視覚誘発電位 (SSVEP) とよばれる点滅する視覚刺激に誘発されて生じる脳波成分を用いる方法がある。SSVEPは人の注意状態を反映し、点滅する刺激に注意を向けている場合、SSVEP振幅が増大する。例えば、視覚刺激が10Hzの間隔で点滅を繰り返している場合、その視覚刺激を注視すると、10HzのSSVEP振幅が増幅することが知られている。また、異なる周波数で点滅する複数個の視覚刺激を呈示し、そのなかから1つの視覚刺激に注目する際、脳波には視覚刺激に対応するSSVEP振幅が増幅するため、注目している視覚刺激を予測できる。この特性からSSVEPを利用することで、人間がどこに注意を向けているかなどの情報が抽出できると考えられる。

これまでにSSVEPを用いて人の注意状態を抽出する研究は多く行われており、Müllerらは複数の異なる周波数を持つ視覚刺激を視界に入れていた場合、注意を向けている視覚刺激に対応するSSVEP振幅が増幅することを示した[1]。Andersenらは複数の異なる周波数を持つ視覚刺激を重ねて

呈示した場合でも、注意を向けている1つの視覚刺激に対応するSSVEP振幅が増幅することを示した[2, 3]。Störmerらは移動する複数の異なる周波数を持つ視覚刺激を呈示した場合でも、注意を向けている1つの視覚刺激に対応するSSVEP振幅が増幅することを示した[4]。また、Andersen, Störmerらの新しい研究では異なる周波数で点滅する複数の対象に対して注意を向けたときに、複数の視覚刺激に対応するSSVEP振幅が増幅することを示した[5, 6]。

これらの研究から様々な視覚刺激においてSSVEPが注意状態を抽出することに対して有用であることが示唆されるが、SSVEPによって複数の対象、移動する対象に対する注意状態が、どの程度抽出できるかを複数の異なる周波数を用いて単一試行ごとに判別し、定量的に示した研究は行われていない。そこで本研究では、SSVEPによって複数の移動対象の注意状態を抽出可能かを確認し、SSVEPによる注意対象の判別を試みることを目的とする。

2. 実 験 方 法

2.1 被験者

11名の健康な豊橋技術科学大学の関係者(平均年齢23歳、内、女性1名)が被験者として実験に参加した。すべての被験者は、タスクについての十分な説明を受け、参加を同意した上で実験を行った。なお、本実験は国立大学法人豊橋技術科学大学安全衛生委員会「ヒトを対象とする実験」審査会の承認を受けて行われた。

2.2 実験手順と呈示刺激

本研究は、静かな環境の暗室（シールドルーム）で行われ、VSG2/5（Cambridge Research System 製）によって刺激を制御し、19 インチの CRT モニタ（Flexscan-T761, EIZO 製、 800×600 pixels, FrameRate: 120Hz）を用いて刺激を呈示した。実験の流れを図1に示す。刺激は白色（ 130cd/m^2 ）の四角、ひし形、丸の3つの形を使用した。四角が12Hz、ひし形が13.33Hz、丸が15Hzの周波数で矩形波状に点滅し、それぞれが時計回りに回転する。刺激の移動については目で刺激を追跡しやすいようにするためであり、また、追跡しやすくすることでSSVEPが生じない可能性を減らすためである。点滅周波数についてはSSVEP振幅が大きく観測されると言われている中間の周波数帯である12～30Hz [7]、特に12～18Hzの周波数のなかから選定した [8]。また、Kimuraらによる実験タスクにおいて、17Hz以上の周波数の点滅刺激を注視する条件の判別率が減少していることがわかる [9]。よって12、13.33、15Hzの周波数はSSVEPを確認するうえで最適な周波数だと考え、選定した。被験者は四角単体、ひし形単体、丸単体の単体注視条件と、四角とひし形、四角と丸、ひし形と丸の複数注視条件、計6つの注視条件のいずれかを注視するように指示した。注視条件を図2に示す。これらの注視条件を各20トライアルずつ行うため計120トライアルを4つのセッションに分け、ランダムな順

図1 実験の流れ

実験における刺激呈示の流れ。初めに注視するターゲットが呈示され、次にそれぞれの対象が点滅しながら回転移動する。その後、タスクに対する応答時間があり、ISIとなる。

単体注視条件			
複数注視条件			

図2 注視条件

上段が単体注視条件、下段が複数注視条件であり、緑色で表示された刺激を注視する。

番で行った。刺激はディスプレイ上の視野角 $13.8^\circ \times 13.8^\circ$ 、被験者から60cm離れた黒色（ 1.1cd/m^2 ）の背景上に呈示された。各トライアルは、図1に示すように、ターゲットの呈示が2,000ms、刺激呈示が5,000ms、応答時間が0～2,000ms、刺激間時間間隔（ISI）が1,000msの順に呈示された。ターゲットの呈示は3つの刺激のうちの1つか2つが緑色（ 92cd/m^2 ）で表示された。刺激の大きさはそれぞれ視野角 4.6° とし、画面中心から視野角 2.3° の距離で描画されている。また、各セッションの初めに、実験タスクとは別にコントロールタスクとして、移動物体に注視していない場合の脳波を取得するために、回転物体呈示中に画面中央を5,000ms注視するように指示した。

実験における刺激呈示の流れ。初めに注視するターゲットが呈示され、次にそれぞれの対象が点滅しながら回転移動する。その後、タスクに対する応答時間があり、ISIとなる。

2.3 実験タスク

被験者には、指示された条件を注視していたかを確認するため、刺激呈示中に注視条件の刺激の色が緑色（ 92cd/m^2 ）に変わった回数をカウントするタスクを与えた。複数注視条件の場合は2つの形の色が変わった回数の合計を数えてもらい、最大2秒間の応答時間で、色の変化回数をキー入力してもらった。刺激の色の变化回数は3つの刺激のいずれかで合計5回変化し、1回の変化時間は8.33msとした。また、1回の色の変化は前の変化から最低でも233msの時間をあけた。

また、実験中は被験者には瞬きを控えるように指示し、瞬きする場合は刺激呈示以外の時間に行うように指示した。

2.4 脳波計測

脳波計測は64chのアクティブ電極（ActiveTwo, Biosemi 製）を被験者の頭皮上に装着し、増幅された信号をサンプリング周波数512HzでA/D変換し、PC上に保存した。また、眼球運動を確認するため右目の上下まぶたと、両目の目尻、両耳朶に電極を装着した。計測チャンネルを図3に示す。

図3 64電極配置

3. 解析方法

解析ソフトとして、Matlab 2012b (MathWorks 社) とオープンソースツールボックスである、EEGLABv12.0.2.2 [10] を使用した。計測された脳波データに対して、ダウンサンプリングを行い、データを200Hzに変換した。そして、バンドパスフィルタ (1~90Hz) をかけ、リファレンスを全電極の平均値 (アベレージリファレンス) とした。使用するデータは、刺激が呈示された5,000msのデータとコントロールタスクで計測したデータから抽出した。試行ごとに切り分けたデータに対して、 $80\mu\text{V}$ を超える電位をアーチファクトとして除去し、さらにEEGLABを用いた傾きによる除去 (最大傾斜=50, $R2=0.3$)、同時確率を用いた除去 (電極内分散=5, 電極間分散=5)、尖度を使用した除去 (電極内分散=5, 電極間分散=5) を利用してアーチファクトを除去した。その後、刺激呈示時の脳波を周波数変換し、加算平均を行い、後頭電極 (PO7, PO3, POz, PO4, PO8, O1, Oz, O2, Iz) のSSVEPパワースペクトルを求めた。最後に、コントロールタスクで計測した脳波を周波数変換し、加算平均したものとのSSVEPパワースペクトルの差を求めた。この時、SSVEP振幅の大きさは被験者、試行毎に異なると考え、被験者毎、また、試行ごとに11.8~15.2Hz間のパワーの最大値で全周波数帯のパワーを割って正規化とした。次にSSVEPによる注意対象の判別のため、正準相関分析 (CCA) によりSSVEPから試行ごとに相関係数を導出後、大小関係によって注視条件を判別し、判別率を導出した。CCAは多変量データにおいて、多数の変数が2つの変数群を構成するときに、変数群間の相互関係を分析するために用いられる。本研究では脳波測定器から得られるチャンネル数とサンプル数からなる2次元の多チャンネル信号データと、全ての視覚刺激の点滅周波数とハーモニクスからなる2次元の信号データ、2つのデータセット間の相関を計算している。そこで得られた点滅周波数毎の相関係数の大小関係を比較することで、どの対象を注視しているかを求めることができる。CCAによる判別は、複数の電極の中から点滅周波数と脳波の相関が最大になるように最適な電極を選択でき、また脳波の振幅と位相情報を考慮して判別できる手法である [11]。また、線形判別分析 (LDA) やサポートベクターマシン (SVM) などの教師あり学習を用いるパターン認識モデルと異なり、事前にデータを計測して分類機を学習させなくても高い判別性能を持っているため、個人に依存しないブレインコンピュータインタフェース (BCI) などの応用に適している。そのため、一般的にSSVEPによる注視条件の判別に用いられている手法である [12]。なお、実験タスクが不正解だった試行は解析から除外した。

各注視条件の12, 13.33, 15Hz帯のパワーに対して有意な差があるかを確認するため、統計解析を行った。要因1を注視条件、要因2を点滅周波数とした2要因分散分析を行った。また、判別率もチャンスレベル (33.33%) に対して有意な差があるかを確認するためt検定 (右側) を行った。

4. 実験結果

4.1 単体注視条件の解析結果

SSVEPパワースペクトルを図4.Aに、各周波数帯の単体注視条件SSVEPパワースペクトルを図4.Bに示す。

図4.Aの12Hz帯に着目すると、12Hzの刺激を注視する条件において高いパワースペクトルが確認できた。同様に、13.33Hz帯に着目すると、13.33Hzの刺激を注視する条件において高いパワースペクトルが、15Hz帯に着目すると、15Hzの刺激を注視する条件において高いパワースペクトルが確認できた。分散分析結果からは、注視条件の主効果 ($F=5.878$, $p<0.01$)、および点滅周波数の主効果 ($F=8.977$, $p<0.001$) があり、交互作用 ($F=31.5549$, $p<0.001$) も確認できた。

図4.Bから、12Hzの刺激を注視する条件の12Hz帯のパワーを13.33Hzの刺激を注視する条件と比較すると、有意な差が生じた ($p<0.001$)。また、15Hzの刺激を注視する条件とも比較すると、こちらも有意な差が生じた ($p<0.001$)。次に13.33Hzの刺激を注視する条件の13.33Hz帯のパワーを12Hzの刺激を注視する条件と比較すると、有意な差が生じた ($p<0.001$)。また、15Hzの刺激を注視する条件とも比較すると、こちらも有意な差が生じた ($p<0.001$)。最後に15Hzの刺激を注視する条件の15Hz帯のパワーを12Hzの刺激を注視する条件と比較すると、有意な差が生じた ($p<0.001$)。また、13.33Hzの刺激を注視する条件とも比較すると、こちらも有意な差が生じた ($p<0.001$)。これらのことから回転する3つの対象のなかから1つの周波数帯のSSVEPを確認できたといえる。

4.2 複数注視条件の解析結果

SSVEPパワースペクトルを図4.Cに、各周波数帯の複数注視条件SSVEPパワースペクトルを図4.Dに示す。

図4.Cの12Hz帯に着目すると、12Hzの刺激を注視することを含んだ条件において高いパワースペクトルが確認できた。同様に、13.33Hz帯に着目すると、13.33Hzの刺激を注視することを含んだ条件において高いパワースペクトルが、15Hz帯に着目すると、15Hzの刺激を注視する条件において高いパワースペクトルが確認できた。分散分析結果からは、注視条件で主効果はなかったが、点滅周波数では主効果 ($F=28.856$, $p<0.001$) があり、交互作用 ($F=20.125$, $p<0.001$) も確認できた。

図4.Dから、12および13.33Hzの刺激を注視する条件の12Hz帯のパワーを13.33および15Hzの刺激を注視する条件と比較すると、有意な差が生じた ($p<0.001$)。同様に、12および15Hzの刺激を注視する条件の12Hz帯のパワーを13.33および15Hzの刺激を注視する条件と比較すると、有意な差が生じた ($p<0.001$)。次に12および13.33Hzの刺激を注視する条件の13.33Hz帯のパワーを12および15Hzの刺激を注視する条件と比較すると、有意な差が生じた ($p<0.001$)。同様に、13.33および15Hzの刺激を注視する条件の13.33Hz帯のパワーを12および15Hzの刺激を注視する条件と比較すると、有意な差が生じた ($p<0.001$)。最後に12および15Hz

図4 各注視条件のSSVEPパワースペクトルと各周波数帯の注視条件SSVEPパワースペクトル

左の図は後頭電極 (PO7, PO3, POz, PO4, PO8, O1, Oz, O2, Iz) の被験者間総加算平均 (N=11) の各注視条件のSSVEPパワースペクトル。横軸が周波数、縦軸が正規化したパワー。右の図は各注視条件の12, 13.33, 15Hz帯のパワーに対して、要因1を注視条件、要因2を点滅周波数とした2要因分散分析を行った結果。横軸が周波数、縦軸が正規化したパワー。エラーバーは標準誤差。Aにおける赤色の線は12Hzの刺激を注視する条件、緑色の線は13.33Hzの刺激を注視する条件、青色の線は15Hzの刺激を注視する条件のSSVEPパワースペクトル。Bにおける赤色のバーは12Hzの刺激を注視する条件、緑色のバーは13.33Hzの刺激を注視する条件、青色のバーは15Hzの刺激を注視する条件。Cにおける黄色の線は12Hzと13.33Hzの2つの刺激を注視する条件、紫色の線は12Hzと15Hzの2つの刺激を注視する条件、水色の線は13.33Hzと15Hzの2つの刺激を注視する条件のSSVEPパワースペクトル。Dにおける黄色のバーは12Hzと13.33Hzの2つの刺激を注視する条件、紫色のバーは12Hzと15Hzの2つの刺激を注視する条件、水色のバーは13.33Hzと15Hzの2つの刺激を注視する条件。
*は注視条件と点滅周波数の交互作用が見られたことを示す。

の刺激を注視する条件の15Hz帯のパワーを12および13.33Hzの刺激を注視する条件と比較すると、有意な差が生じた ($p < 0.001$)。同様に、13.33および15Hzの刺激を注視する条件の15Hz帯のパワーを12および13.33Hzの刺激を注視する条件と比較すると、有意な差が生じた ($p < 0.05$)。これらのことから回転する3つの対象のなかから2つの周波数帯のSSVEPを確認できたといえる。

4.3 CCAによる判別結果

CCAによりSSVEPから単体注視条件における被験者毎の判別率を導出した。判別方法はCCAにより求めた各点滅刺激に対応した相関係数の大小関係で判別した。つまり、単体注視条件では、ある試行の脳波と12Hzで点滅する刺激の点滅周波数との相関係数、13.33Hzで点滅する刺激の点滅周波数との相関係数、15Hzで点滅する刺激の点滅周波数との相関係数を求め、それぞれの相関係数の大小関係でいずれかの点滅刺激を注視していたかを判別した。複数注視条件では、ある試行の脳波と各刺激の点滅周波数との相関係

数を求め、相関係数が大きい順の2つの周波数と複数注視条件の周波数が一致するかで複数の点滅刺激を注視していたかを判別した。

被験者毎の判別率を平均したものを図5に示す。12Hz, 13.33Hz, 15Hzを注視していた条件に対してそれぞれ95.55%, 96.38%, 90.79%となり、高い判別率が得られた。また、12Hz, 13.33Hz, 15Hzを注視していた条件全てがチャンスレベルと比べ、有意に高いことを確認した ($p < 0.001$)。この結果から、先行知見通り、SSVEPにより複数の移動対象のなかから1つの対象の注意状態を抽出できたと考える。次に12および13.33Hzを注視していた条件で59.74%, 12および15Hzが52.07%, 13.33および15Hzが49.62%であり、単体注視条件ほど高い判別率とはならなかった。しかし、12および13.33Hzを注視していた条件はチャンスレベルと比べ、有意な差があり ($p < 0.001$)、また、12および15Hzを注視していた条件もチャンスレベルと比べ、有意な差があった ($p < 0.05$)。最後に13.33および15Hzを注視していた条件もチャンスレベルと比べ、有意な差があった ($p < 0.01$)。この

定常状態視覚誘発電位による複数移動対象への注意状態の推定

図5 CCAによる各注視条件の判別率

CCAによりSSVEPから導出した各注視条件における被験者平均の判別率 ($N=11$)。横軸が注視条件、縦軸が判別率、エラーバーは標準誤差。
*はt検定(右側)を行い、注視条件毎の判別率とチャンスレベル(33.33%)に対して有意な差が見られたことを示す。

結果から、SSVEPにより複数の移動対象のなかから2つの対象の注意状態を抽出できたと考える。

5. 考察

5.1 各注視条件のSSVEPパワースペクトル

単体注視条件、複数注視条件のいずれにおいても、各注視条件に対応するSSVEPパワースペクトルを確認することができたため、先行知見と同様な結果となった。このことから本研究の実験の流れはSSVEPから注意状態を抽出することにおいて適当であると確認された。しかし、複数注視条件は単体注視条件と異なり、周波数帯に縛られずにパワーの大きさで対象を注視していたかを単一試行ごとに判別し、定量的に示すことは難しいと考えられる。図4.Cに示すように複数注視条件のSSVEPパワースペクトルでは、注視していたとしても15Hz帯のパワーより12Hz帯のパワーが大きいことがある。これはアルファ帯(8~13Hz)の脳波が影響したと考えられる[7]。視覚刺激を注視していたときにアルファ帯の脳波と点滅刺激によって誘発されたSSVEPが重なることでアルファ帯のパワーが大きくなった可能性がある。Andersenらの研究におけるSSVEPパワースペクトルでもアルファ帯のパワーが大きく、それ以上の周波数帯のパワーは小さくなっている[2, 3]。このことから、複数の点滅刺激を注視することで生じるSSVEPはアルファ帯の脳波の影響を受けやすいと考えられる。よって、複数の対象を注視していたかの判別にはパワーの大小関係による比較では難しいことが示唆される。

5.2 各注視条件の注意対象の判別方法について

複数注視条件の注意対象の判別手法に関しては前項のような問題があるため、単純なパワーの大小関係では判別できなと考えられる。それに対し、CCAによる判別は脳波測定器から得られる多チャンネル信号と視覚刺激の点滅周波数の2つのデータセット間の相関を計算し、注視していた対象を求めるため、前項のような問題にも対応できる良い判別手法

だと考えられる。よって、本研究の結果では単体注視条件の判別率は90%を超える高い判別率となり、複数注視条件の判別率は単体注視条件の判別率より低いもののチャンスレベル(33.3%)より有意に高い判別率となり、SSVEPによる注意対象の判別が可能であることが示唆される。

5.3 単体注視条件と複数注視条件の判別率の差について

CCAによる各注視条件の判別から、複数注視条件の判別率は単体注視条件の判別率より全体的に低い傾向となった。原因として、1つの対象を注視するより、複数の対象を注視する方が難しいことが考えられる[13]。次に、単体注視条件と複数注視条件では注意の向け方が異なっていたことが考えられる。視覚的注意には視線が一致する顕在的注意と視線が一致しない潜在的注意がある。潜在的注意によって誘発されるSSVEP振幅の変調は、顕在的注意と比べ、小さいことが知られており[14]、顕在的注意と潜在的注意を利用したBCIでは、潜在的注意を利用した方がパフォーマンスが低いことがわかっている[15]。本研究の単体注視条件では1つの対象を注視するため、顕在的注意によって注視していたと考えられ、複数注視条件では2つの対象に対して同時に注意を向けるため、潜在的注意によって注視していたと考えられる。このことからSSVEP振幅の変調が小さく、判別が上手くいかなかった可能性が考えられる。最後に、刺激の呈示位置によって注視が難しいことが考えられる。先行研究では、左右どちらかの半視野に2つの注視対象があるとき2つの注視対象に対する注意のパフォーマンスが下がることがわかっている[16]。またSSVEPにおいてもこのような条件における注視ではSSVEPが誘発されず、注意を反映しないことがわかっている[6]。本研究では3つの対象が時計回りに回転するため、2つの対象を注視する際に2つの対象が左右どちらかの半視野に呈示される期間があり、2つの注視対象に対する注意がSSVEPに反映されないときがあった可能性が考えられる。これらのことから、複数注視条件の判別率は単体注視条件の判別率より全体的に低い傾向になったと考えられる。

5.4 単体注視条件か複数注視条件かの判別

本研究では注視条件の判別を単体注視条件と複数注視条件で分けて行っているが、実際には1つの対象を注視しているのか、複数の対象を注視しているのか不明な場合が考えられる。本研究のCCAによる判別解析では、ある試行の脳波と各刺激の点滅周波数との相関係数を求め、相関係数が大きい順の2つの周波数と複数注視条件の周波数が一致するかで複数の点滅刺激を注視していたかを判別した。例えば12および13.33Hzを注視していた条件では、ある試行の脳波と12Hzで点滅する刺激の点滅周波数との相関係数および13.33Hzで点滅する刺激の点滅周波数との相関係数が15Hzで点滅する刺激の点滅周波数との相関係数より大きければ、12および13.33Hzを注視していたと判別した。この時、12および13.33Hzの相関係数の大小関係は考慮していない。このような判別を行ったため、単体注視条件か複数注視条件かの判別はできない。

1つの対象だけを注視していたのか、複数の対象を同程度に注視していたかを相関係数の値から推測できるかもしれないが、本研究では試行や被験者によって相関係数の大小関係にばらつきがあったため推測することはできなかった。今後は、潜在的注意の考慮や最適な信号処理によって単体注視条件か複数注視条件かの判別が可能かを検討する。

6. ま と め

人間は、視界に映る複数の移動物体を同時に捉えている。そこで人間がどこに注意を向けているかという情報を抽出することでできれば、様々のことに応用できるかもしれない。本研究では、人の注意状態を抽出する方法として、視覚刺激に誘発されて生じる脳波成分のSSVEPを用いた。SSVEPは人の注意状態を反映し、点滅する刺激に注意を向けている場合、SSVEP振幅が増大する。SSVEPが注意状態を抽出することに対して有用であることが示唆されるが、SSVEPによって複数の対象、移動対象に対する注意状態が、どの程度抽出できるかを定量的に示した研究は行われていない。そこで本研究ではSSVEPによって複数の移動対象の注意状態を抽出可能かを確認し、SSVEPによる注意対象の判別を試みた。

実験方法は、異なる周波数で点滅する3つの物体（四角：12Hz、ひし形：13.33Hz、丸：15Hz）を時計回りに回転させ、被験者に単体注視タスク（3つのうちどれか1つを注視）と複数注視タスク（3つのうちどれか2つを注視）を行い、その時の脳波を計測した。

解析方法は、計測された脳波データに対して、1～90Hzのバンドパスフィルタをかけ、注視条件ごとにデータを分類し、脳波データに含まれるアーチファクトを除去した後、コントロール条件の脳波との差を求めた。最後に刺激呈示時の脳波の加算平均を行い、後頭電極（PO7, PO3, POz, PO4, PO8, O1, Oz, O2, Iz）のSSVEPピーク振幅を求めた。また、CCA [11] によりSSVEPから試行ごとに注視条

件を判別した。

単体注視条件では、どの物体を注視していた場合でも、注視した物体の点滅周波数に対応したSSVEPが生じた。CCAによる判別率は、12Hz、13.33Hz、15Hzを注視していた条件に対してそれぞれ95.55%、96.38%、90.79%となり、高い判別率が得られた。複数注視条件においても、各注視条件に対応した周波数帯で高い振幅が見られ、各周波数帯で注視した2条件は有意にパワーが大きいことを確認した。CCAによる判別率は、12および13.33Hzを注視していた条件で59.74%、12および15Hzが52.07%、13.33および15Hzが49.62%であり、チャンスレベル（33.3%）より有意に高いことを確認した。この結果から、SSVEPにより3つの移動対象のなかから2つの対象の注意状態を抽出可能であることが確認できた。

これらのことから、SSVEPにより複数の移動対象の注意状態を抽出可能であり、SSVEPによる注意対象の判別が可能であることが示唆された。しかし、顕在的注意と潜在的注意によるSSVEP振幅変調の違い [14] や、呈示刺激の呈示位置などの影響が考えられるため、潜在的注意の考慮や最適な信号処理を行うことで、より正確に複数の移動対象の注意状態を抽出できると考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、科研費25330169、26240043および、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE) 142106002の援助により行われた。

参 考 文 献

- [1] M. M. Müller, P. Malinowski, T. Gruber and S. A. Hillyard; Sustained division of the attentional spotlight, *Nature*, 424(6946), pp.309-312, 2003.
- [2] S. K. Andersen, S. A. Hillyard and M. M. Müller; Attention facilitates multiple stimulus features in parallel in human visual cortex, *Current Biology*, 18(13), pp.1006-1009, 2008.
- [3] S. K. Andersen and M. M. Müller; Behavioral performance follows the time course of neural facilitation and suppression during cued shifts of feature-selective attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(31), pp.13878-13882, 2010.
- [4] V. S. Störmer, G. N. Winther, S. C. Li and S. K. Andersen; Sustained multifocal attentional enhancement of stimulus processing in early visual areas predicts tracking performance. *The Journal of Neuroscience*, 33(12), pp.5346-5351, 2013.
- [5] S. K. Andersen, S. A. Hillyard and M. M. Müller; Global facilitation of attended features is obligatory and restricts divided attention. *The Journal of Neuroscience*, 33(46), pp.18200-18207, 2013.

定常状態視覚誘発電位による複数移動対象への注意状態の推定

- [6] V. S. Störmer, G. A. Alvarez and P. Cavanagh; Within-hemifield competition in early visual areas limits the ability to track multiple objects with attention. The Journal of Neuroscience, Vol. 34, No. 35, pp. 11526-11533, 2014.
- [7] D. Zhu, J. Bieger, G. G. Molina and R. M. Aarts; A survey of stimulation methods used in SSVEP-based BCIs, Computational intelligence and neuroscience, 2010: 1, 2010.
- [8] R. Kus, A. Duszyk, P. Milanowski, M. Labecki, M. Bierzynska, Z. Radzikowska, M. Michalska, J. Zygierecz, P. Suffczynski and P. J. Durka; On the quantification of SSVEP frequency responses in human eeg in realistic bci conditions, PLoS One, 8(10), e77536, 2013.
- [9] Y. Kimura, T. Tanaka, H. Higashi and N. Morikawa; SSVEP-based brain-computer interfaces using fsk-modulated visual stimuli. Biomedical Engineering, IEEE Transactions on 60(10), pp.2831-2838, 2013.
- [10] A. Delorme and S. Makeig; Eeglab: an open source toolbox for analysis of singletrial eeg dynamics including independent component analysis. Journal of neuroscience methods, 134(1), pp.9-21, 2004.
- [11] Z. Lin, C. Zhang, W. Wu and X. Gao; Frequency recognition based on canonical correlation analysis for SSVEP-based bcis. Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, 53(12), pp.2610-2614, 2006.
- [12] Gao. S, Wang. Y, Gao. X, and Hong. B; Visual and auditory brain-computer interfaces. Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, 61(5), pp.1436-1447, 2014.
- [13] Z. W. Pylyshyn and R. W. Storm; Tracking multiple independent targets: Evidence for a parallel tracking mechanism*, Spatial vision, 3(3), pp.179-197, 1988.
- [14] S. Walter, C. Quigley, S. K. Andersen and M. M. Müller; Effects of overt and covert attention on the steady-state visual evoked potential, Neuroscience letters, 519(1), pp.37-41, 2012.
- [15] D. Lesenfants, D. Habbal, Z. Lugo, M. Lebeau, P. Horki, E. Amico, C. Pokorny, F. Gomez, A. Soddu, G. Muller-Putz, S. Laureys and Q. Noirhomme; An independent SSVEP-based brain-computer interface in locked-in syndrome, Journal of neural engineering, 11(3), 035002, 2014.
- [16] G. A. Alvarez, and P. Cavanagh; Independent resources for attentional tracking in the left and right visual hemifields, Psychological Science, 16(8), pp.637-643, 2005

新海 崇紘 (非会員)

平成3年生まれ、平成24年 苫小牧工業高等専門学校卒業、平成26年 豊橋技術科学大学 情報・知能工学課程卒業、同年豊橋技術科学大学情報・知能工学専攻入学。現在在学中。

南 哲人 (正会員)

平成16年 京都大学大学院情報研究科博士課程修了(情報学博士)。平成16年ー平成20年 独立行政法人情報通信研究機構関西先端研究センター・脳情報グループ・専攻研究員。現在は、豊橋技術科学大学エレクトロニクス先端融合研究所・認知神経工学研究室・准教授。顔情報処理などに関する非侵襲計測研究や、ブレインコンピューターインターフェースに関する研究に従事。平成23年 ISNIP membership award 受賞。

中内 茂樹 (正会員)

豊橋技術科学大学 情報・知能工学系 教授。平成5年 豊橋技術科学大学博士後期課程修了。同年同大学情報工学系助手。平成19年より現職。博士(工学)。視覚現象の実験的・計算論的研究、色彩工学、分光イメージングに関する研究に従事。平成23年度文部科学大臣表彰科学技術賞【開発部門】、第9回産学官連携功労者表彰経済産業大臣賞各受賞。