法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-16

複数の点滅視覚刺激環境下における定常状態 視覚誘発電位(SSVEP)による脳波の識別に関 する研究

松尾, 拓実 / MATSUO, Takumi

(出版者 / Publisher)法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)
 法政大学大学院紀要.理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要.理工学・工学研究科編
 (券 / Volume)

57 (開始ページ / Start Page) 1 (終了ページ / End Page) 8 (発行年 / Year) 2016-03-24 (URL) https://doi.org/10.15002/00012998

複数の点滅視覚刺激環境下における定常状態視覚誘発 電位(SSVEP)による脳波の識別に関する研究

STUDY ON DISTINCTION OF ELECTROENCEPHALOGRAM VIA STEADY STATE VISUAL EVOKED POTENTIAL UNDER THE CONDITION OF PLURAL BLINKING ANIMATIONS FOR VISUAL STIMULUS

松尾拓実 Takumi MATSUO

指導教員 石井千春

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

In this study, a detection method of steady state visual evoked potential (SSVEP) in short time was investigated for the sake of future use in brain machine interface (BMI). Preliminary experiments were carried out to determine the form and color of a blinking symbol and the number of the electrodes to be used. As results, the blinking symbol of 10Hz and 12Hz was chosen as white square with black background, and the blinking symbol of 15Hz was chosen as white square with blue background. In addition, three electrodes were chosen to be used. Using the short time Fourier transform (STFT) and the moving-average method, the analysis method of electroencephalogram (EEG) for detecting SSVEP and detection conditions of SSVEP were determined. Then, experiments for distinguishing SSVEP were executed under the condition that three kinds of the blinking animation, in which the white square symbol blinks in 10Hz, 12Hz, and 15Hz respectively, were presented simultaneously as visual stimulus. Accuracy rate of more than 90% was obtained for distinction of each stimulus frequency in 2 to 6 sec.

Key Words : Electroencephalogram (EEG), Brain machine interface (BMI), Steady state visual evoked potential (SSVEP), Moving-average method

1. 緒言

身体機能に障がいを持つ患者が介護者に頼ることな く自由に行動するために,様々な福祉機器が開発されて きた、しかし、これらの福祉機器を使用するには他の身 体機能を使用することによって代替する場合が多く,筋 萎縮性側索硬化症(ALS)のように全身の身体機能が衰 える病気を抱える患者では使用が困難である.そこで, そのような患者でも使用できるシステムとして脳の信 号を用いるブレイン・マシン・インタフェース (BMI) が挙げられる. 文献[1]及び文献[2]では、ヒトの運動野 による BMI の開発に向けた臨床試験が報告されている. 四肢麻痺を患った被験者に対して,脳の一次運動野に96 本の微小電極が並んだ装置(ブレインゲイト)を取り付 け,運動意図に基づく運動野ニューロン集団の活動パタ ーンをインタフェースが読み取り,機械信号に変換する ことで、文献[1]ではパソコンのカーソル操作やクリッ ク, 文献[2]では義手の操作を行っている. 文献[3]では, 被験者に左右の腕の運動想起を行わせ, 頭皮上に取り付 けた6個の電極で脳波を測定し、測定した脳波を Wavelet 解析によって周波数領域に変換する. そして解析データ から Support vector machine(SVM)によって左右の腕の運 動想起の分別を行い、その結果に基づいてピューマ・ロ ボットの操作を行っている. 文献[4]では、リハビリテ ーション・トレーニングを補助する脚部の外骨格ロボッ トを脳波で操作するシステムを開発している. 脳波から 上,下の意識を分類し,それぞれ立ち上り,腰掛け動作 を補助するように外骨格ロボットを制御している. 文献 [5]では、ライントレースにより移動する電動車椅子が 分岐点に差し掛かった時に,搭乗者の頭皮上に取り付け た 15 個の電極で脳波を測定し、搭乗者の操縦内容(前 進,右旋回,左旋回)の意識を読み取ることにより,電 動車椅子を操作している. また文献[6]では, Emotiv 社 製の非侵襲式の BMI デバイスを用いて, 搭乗者の意識 (前,右,左)を検知し、それぞれの意識に対応する指 令(前進,右折,左折)を電動車椅子に出力するシステ ムを開発している.2時間弱の訓練の後、3種類の意識 の認識率は84~91%であり、電動車椅子の制御を高精度 に行っている. また文献[7]では, 文献[6]と同様の BMI デバイスを用いて,被験者の3種の意識(Rest, UP, DOWN)を読み取って識別する BMI システムを開発して いる.15分間の訓練の後,全体的な識別率は最大75% となっている.

しかしながら,運動想起や前,右,左などの概念の想 起など,脳波からの意識の検出には個人差が大きく,ま た必ずしも検出できるとは限らない.文献[8]では,BMI システムの構築のために,視覚的な点滅刺激から一般的 に安定して表れる,定常状態視覚誘発電位(SSVEP)の解 析を行っている.4種類の刺激周波数でLEDを点滅させ, 点滅する LED を見た時の3秒間の脳波の解析データか ら得られた各周波数に対する SSVEP の平均検知率は53 ~84%であった.更に,与えた視覚刺激の周波数とその 高調波の振幅スペクトルを足し合わせることで,検知率 は70~80%になった.しかし,LEDによる視覚刺激が強 すぎると,光てんかんを引き起こす可能性がある.

本研究では、将来的に電動車椅子をBMIにより制御す るための基礎研究として、BMIに使用できる脳波の解析 手法を模索することを目的とする.そこで、オンライン での運用に備えて、SSVEPを短時間で検出する方法を 検討した.光てんかんが起きないようにするため、光刺 激が弱いと考えられる動画を用いて PC 画面上で視覚刺 激を与え、極力電極数が少なく、学習アルゴリズムを必 要としない検出方法を考えた.また、この検出方法によ り、複数の視覚刺激が与えられている状態で、注目した 視覚刺激を識別できるかどうかの検証を行った.

2. 研究目的

(1) 定常状態視覚誘発電位(SSVEP)

人が視覚的な外部刺激を見たときに、後頭部にある視 覚野で生じる誘発電位のことを視覚誘発電位(Visual Evoked Potential: VEP)と呼ぶ.そして視覚刺激の提示頻 度を上げる場合に生じる視覚誘発電位のことを特に定 常状態視覚誘発電位(Steady State Visual Evoked Potential: SSVEP)と呼ぶ.提示頻度がある周波数の視覚刺激であ るとき,脳波(Electroencephalogram: EEG)から刺激に 対する周波数成分とその高調波の振幅スペクトルが,他 の周波数よりも強く出ることが知られている.また, SSVEP はブレイン・マシン・インタフェース (BMI)で 用いられる他の事象関連電位に比べて,比較的安定して 現れることが知られている.

(2)研究目的

BMIにより機器を制御するための基礎研究として、本研究では SSVEP に注目する. 点滅する視覚刺激を与え て脳波の測定実験を行い,短時間で SSVEP を検出する 方法を定め,この方法を用いて複数の視覚刺激が与えら れている状態で,注目した視覚刺激の識別が可能である かどうかを確かめることを目的とする. なお,本研究で はすべての実験に対して,22歳の右利きの成人男性1人 を被験者とした.

3. 予備実験

(1) 脳波の測定位置

脳波の測定には、株式会社デジテックス研究所製生体 信号記録装置 Polymate II を用いる.測定時はアクティブ 電極に脳波測定用ペーストを塗り、髪の毛をかき分ける ようにして、電極を頭皮上に貼り付ける.測定位置は後 頭部結節に電極1 番を取り付け、頭頂部に向かって 20mm ほど上部に電極2 番を取り付け、電極2 番を中心 に等間隔となるように他の三方向に電極3番から5番を 配置した.これは後頭部に視覚野が分布しているため、 拡張国際 10-20 法に基づき、測定点の最下点を後頭部結 節と定め、後頭部を最小限の電極数で覆うためである. 測定位置を図1 に示す.



Fig. 1 Measurement position of EEG

(2) 色の組合せを決める実験

点滅する図形の色と背景色により,SSVEP がより強く 表れる組合せを調べるための実験を行った.実験では視 覚刺激として C++言語で作成した SSVEP 用視覚刺激提 示ソフトを使用する.点滅する図形には四角を用い,色 は白と赤,背景色は黒と青を用意し,図形の色と背景色 の全ての組合せ(白黒,白青,赤黒,赤青)に対して,図 形の点滅周波数を10Hz,15Hzの2種類とした.視覚刺激 を 30 秒提示し,各3回分の EEG を測定した.サンプリ ング周波数は,1kHz とした.なお,本実験での脳波測 定における電極配置は,図1の電極3番,4番の下側に それぞれの電極間隔が20mm となるように,さらに2個 電極を追加し,電極5番は装着しなかった.

脳波の解析手法は次のようにした.図2に示すように, EEG データの全区間 16384 点(約 16 秒間)に対して, データの解析区間を 2048 点(約 2 秒間)とし,データ のオーバーラップは行わずに,分割された 8 つの区間の EEG データそれぞれを短時間フーリエ変換(STFT)し, 加算平均を行う.



Fig. 2 Method of data analysis for EEG

それぞれの条件(色の組合せ4種, 点滅周波数2種, 電極6個)において測定された EEG に対して, 前述の データ解析を行った.各電極における解析結果から,与 えた視覚刺激の周波数とその高調波に対する周波数付 近にピーク値が現れ,明らかに SSVEP が現れたと考え られる電極の数をカウントし,どの程度 SSVEP が出現 したかをまとめたものを表1に示す.表内の数値は百分 率表記である.

Table 1 SSVEP appearance ratio in color combination [%]

Color of	White	White	Red	Red
blinking figure	and	and	and	and
and background	Black	Blue	Black	Blue
10Hz	72.2	50.0	61.1	38.9
15Hz	27.8	55.6	111	22.2

この結果から,刺激周波数 10Hz における白黒の組合 せの時の出現率が 72.2%と最も高く,また白黒の組合せ が他の組合せより図形と背景の境界を認識しやすいと 考え,本研究では図形の色は白,背景色は黒に設定する ことにした.

(3) 図形の形を決める実験

どのような図形により, SSVEP がより強く表れるかを 調べるための実験を行った.実験では視覚刺激として, 30 秒間図形が点滅表示する動画を作成した.点滅させる 図形には,丸,三角,四角の3種類を用意し,点滅周波 数は,8Hz,10Hz,12Hz,15Hzの4種類とした.この実 験での電極は図1のように配置し,視覚刺激を30秒提 示し,各3回分のEEGを測定した.サンプリング周波 数は,1kHzとした.

それぞれの条件(点滅図形3種,点滅周波数4種,電 極5個)において測定された EEG に対して,3.2節と同 じデータ解析を行った.各電極における解析結果から, 与えた視覚刺激の周波数とその高調波に対する周波数 付近にピーク値が現れ,明らかに SSVEP が現れたと考 えられる電極の数をカウントし,どの程度 SSVEP が出 現したかをまとめたものを表2に示す.表内の数値は百 分率表記である.

この結果から、本研究では点滅させる図形を一番出現 率が高かった四角に設定することにした.

ruore 2 00 v 21 uppeuranee runo ror euen ingure [/o]					
	8Hz	10Hz	12Hz	15Hz	Average
Circle	40.0	40.0	46.7	46.7	43.3
Triangle	60.0	40.0	6.67	46.7	38.3

46.7

60.0

60.0

Table 2 SSVEP appearance ratio for each figure [%]

(4) SSVEP を検出するための周波数を調べる実験

66.7

66.7

Square

EEGをフーリエ解析した際に,被験者の生理的な要因等により,必ずしも与えた視覚刺激の点滅周波数とちょうど同じ値に振幅スペクトルのピークが出るとは限らない.そこで,各点滅周波数に対して,SSVEPが現れたと考えられる周波数を調べる実験を行った.視覚刺激として,図3に示すように黒の背景に白い四角の図形を30秒間点滅表示する動画を作成し,点滅周波数は,8Hz,

10Hz, 12Hz, 15Hzの4種類用意した.

以下に示す2つの条件で脳波の測定を行った.

a) 白い四角の図形を表示したまま点滅させない状態

b) 白い四角の図形を 8Hz, 10Hz, 12Hz, 15Hz で点滅 させた状態



Fig. 3 The blinking animation as visual stimulus

本実験のサンプリング周波数は 1kHz とし, 椅子に座 った状態で目から動画の画面までの距離を 45~50cm と した体勢で実験を行った. a)の点滅なしの状態では, 被 験者に図形を表示した状態の画面を注視してもらい, 脳 波が落ち着いた時点を測定開始とし, 脳波を 30 秒間測 定した. b)の視覚刺激を提示する状態では, まず脳波の 測定開始前に, 被験者に測定対象とする周波数の点滅表 示動画を 3 回見せて, 視覚刺激に慣れてもらった. その 後, 脳波の測定を開始し, 脳波が落ち着いた時点で 30 秒間の点滅表示動画を再生した. その際, 視覚刺激を提 示した時間が分かるように, 動画の再生開始時と終了時 の時刻を記録した. この作業を 8Hz, 10Hz, 12Hz, 15Hz の順で行い, 点滅なしの状態と4 種類の周波数による点 滅表示を1 セットとし, 12 セット分の脳波を測定した.

解析手法は次のようにした.解析の開始点を,点滅な しの状態では測定開始時刻,点滅させた状態では刺激提 示開始時刻とする.EEG データの全区間は 8192 点(約 8 秒間),データの解析区間は 2048 点(約 2 秒間)とし, データのオーバーラップは行わない.分割された4 つの 区間の EEG データそれぞれを短時間フーリエ変換 (STFT)し,加算平均を行う.各電極における解析結果 から,与えた点滅周波数に対して,実際に振幅スペクト ルのピーク値が現れた周波数とその高調波に対する周 波数を読み取った.12 セット分の測定データに対して, ピークが現れた周波数帯とその高調波に対する周波数 帯を電極毎にまとめたものを表 3 に示す.

Table 3 Frequency band for appearance of SSVEP [Hz]					
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5

	110.1	110.2	110.5	110.1	110.5
8Hz	7.32~9.76	7.32~9.76	7.32~9.76	6.83~8.78	7.32~9.27
Harmonics	15.1~16.6	16.1	15.6~16.1	15.6~16.1	15.1~16.6
10Hz	9.76~10.7	9.76	9.27~10.2	8.78~10.2	9.27~10.2
Harmonics	19.0~20.5	20.0	20.0	20.0	19.0~20.9
12Hz	11.7~12.2	11.7~12.2	11.7~12.2	11.7~12.6	11.7~12.2
Harmonics	22.9~23.9	23.9	23.9	23.9	23.4~24.9
15Hz	14.1~15.1	14.6~15.1	14.6~15.1	14.6~15.1	15.1
Harmonics	29.7~30.2	29.7~30.2	29.7~30.2	29.7~30.2	29.7~30.2

表 3 に示すように,特に低周波数の点滅刺激 (8Hz,10Hz)においては帯域幅が大きく,SSVEPが出現 したと考えられる周波数が安定していないが,高周波数 の点滅刺激(12Hz, 15Hz)においては、刺激を与えた周 波数とほぼ同じ周波数において SSVEP が出現している と考えられる.そこで本研究では、各点滅周波数に対し て、SSVEPを検出するために振幅スペクトルを求める周 波数を、与えた点滅周波数(8Hz, 10Hz, 12Hz, 15Hz) とその高調波(16Hz, 20Hz, 24Hz, 30Hz)と同じ値と することにした.

(5) 電極数を減らすための実験

電極数は少ない方が好ましいので、電極数を減らすた めの実験を行った.3.4節で測定した EEG データを用い て、同じ解析手法により、オーバーラップを行わず、分 割された4つの区間の EEG データそれぞれを STFT し、 今回与える8Hz、10Hz、12Hz、15Hz の刺激周波数とそ の高調波の振幅スペクトルを足し合わせる.そして、足 し合わせたそれぞれの振幅スペクトルを解析開始時間 から解析終了時間まで時系列順に並べてグラフ化し、点 滅なしの状態とそれぞれの刺激周波数で点滅させた状 態のグラフを比較する.

それぞれの条件(点滅なし,点滅周波数4種,電極5 個)において測定された EEG に対して,上記の解析を 行った.一例として,電極2番で測定した9セット目の 測定データにおける点滅なしの状態の8Hzの振幅スペ クトルと,点滅周波数8Hzの視覚刺激を与えた時の8Hz, 10Hz, 12Hz, 15Hzの振幅スペクトルを図4に示す.



Fig. 4 Amplitude spectrum for each frequency

他の電極や他のセットの測定データにおいても,図4 に示されるように、与えた刺激周波数とその高調波の振 幅スペクトルの和が、点滅なしの状態よりも大きく、か つ与えた刺激周波数ではない周波数とその高調波の振 幅スペクトルの和よりも大きくなることが概ね観測で きた.これより、電極数を減らすために上記の現象がよ り顕著に現れる電極を調べる.

各電極における 1 セットから 12 セットまでの解析結 果において、与えた刺激周波数とその高調波の振幅スペ クトルの和が他の周波数よりも連続して2点以上大きく なっている解析結果の数を電極ごとにカウントする.た だし、下記の条件に当てはまる場合はカウントしないこ ととする.

i)与えた刺激周波数ではない周波数が先にカウント の条件を満たし、その後に与えた刺激周波数がカウント の条件を満たした場合 ii)与えた刺激周波数における振幅スペクトルの和と 他の周波数における振幅スペクトルの和の大小が目視 で確認できない場合

上記の条件から得られた各電極におけるカウント数 を,全12回で除することにより求めた,電極毎の刺激 周波数に対する感度を表4に示す.表内の数値は百分率 表記である.

Table 4 Sensitiveness of electrode for stimulus frequency [%]

Lote : Sensitiveness of electrode for sumarus frequency [/o]					
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
8Hz	8.33	33.3	66.7	83.3	33.3
10Hz	50.0	75.0	58.3	75.0	41.7
12Hz	66.7	91.7	83.3	100	25.0
15Hz	25.0	75.0	91.7	100	8.33
Total	37.5	68.8	75.0	89.6	27.1

この結果から,電極1番と5番は他の電極に比べて感 度が低いため除外し,電極2番,3番,4番をSSVEP検 出のための電極として採用することにした.

4. SSVEP の検出実験

(1) SSVEP の検出条件

予備実験の結果から,視覚刺激には黒の背景に白い四 角の図形の点滅表示を用い,電極配置は,図1の電極2 番,3番,4番の3個の電極とする.また,点滅周波数 は8Hz,10Hz,12Hz,15Hzの4種類とする.ここで, 短時間でSSVEPを検出するための脳波の解析手法を以 下のように定める.ただし,3.5節の実験結果から,点 滅なしの状態は解析に影響を与えないと考えたため,本 実験においては考慮しないものとする.

解析の開始点は,刺激提示開始時刻とする. EEG デー タの全区間を 6144 点(約6秒間),データの解析区間 を 2048 点(約2秒間)とし,データのオーバーラップ を 1792 点(約1.75秒間)とする.図5に示す8つの区 間の EEG データそれぞれを STFT し,それぞれにおいて 8Hz, 10Hz, 12Hz, 15Hz の刺激周波数とその高調波の振 幅スペクトルを足し合わせる.そして各周波数に対して, 8 つの区間毎に移動平均を求める.



Fig. 5 Method of data analysis for detecting SSVEP

それぞれの条件(点滅周波数4種,電極3個)に対し て、3.4節の実験で測定した EEG データを用いて、上述 した解析を行う. 足し合わせたそれぞれの振幅スペクト ルを解析開始時間から解析終了時間まで時系列順に並 べてグラフ化した.一例として,点滅周波数 8Hz の視覚 刺激を与えた時の電極3番で測定した3セット目の測定 データにおける脳波の解析結果を図6に示す.



Fig. 6 Result of data analysis

図6より,8Hzの振幅スペクトルの和が他の周波数の 振幅スペクトルの和よりも大きく現れていることがわ かる. 実際,移動平均を行うことにより,上述の解析手 法において移動平均を行わずに同じ脳波の測定データ を解析した結果よりも、この現象が明確に現れることを 確認している.

以上の結果に基づいて, SSVEPの検出条件を以下のよ うに定める. 前述の解析手法で得られた移動平均を適用 した各電極における解析結果(例えば図6)において, 与えた刺激周波数とその高調波の振幅スペクトルの和 が他の周波数よりも連続して4点以上大きくなる電極の 数をカウントする.カウントしない条件は3.5節で記し たi), ii)の条件と同じとする. そして, 3 個の電極の うち、2個以上の電極がカウントされれば、その測定デ ータにおいて与えた点滅周波数に対する SSVEP が検出 できたとする.

(2) SSVEP の検出実験結果

4.1 節で定めた SSVEP の検出条件を 3.4 節で測定した EEG データに適用して,提案した検出方法により SSVEP を検出できるかを検証した. それぞれの刺激周波数に対 して SSVEP が 6 秒以内に検出できたかどうか、及びそ の時にカウントされた電極数を表5に示す.検出できた 場合は〇,検出できなかった場合は×で表し,括弧内の 数値が電極数を表している.また,SSVEPを検出できた 時において, 刺激提示から 2~4 秒, 2~6 秒ごとの SSVEP の累積検出率を表6に示す.表内の数値は百分率表記で ある.

表5のSSVEPの検出結果より,実験回数12回中8Hz, 10Hz は 9回, 12Hz, 15Hz は 12回 SSVEP を検出できた. 特に12Hz, 15Hzは全実験で3個の電極全てがカウント された. また, 表 6 より, 8Hz, 10Hz では 2~6 秒間で 検出率 75%, 12Hz, 15Hz では 2~6 秒間で検出率 100% となっており, 高周波数ほど速く高い検出率が得られて いる.低周波数においては、本研究の被験者は特に8Hz の点滅周波数に対して高い検出率が得られなかった.

低周波数において高い検出率が得られていない理由 として, 表3に示したように, 低周波数 (8Hz, 10Hz) において SSVEP が出現したと考えられる周波数が安定 していないことが挙げられる.したがって、与えた周波 数付近の振幅スペクトルを考慮に入れて、脳波の解析手 法を修正することにより,低周波数に対する検出率を向 上できる可能性がある.

Table 5 Experimental result of detecting SSVEP [%]						
	8Hz	10Hz	12Hz	15Hz		
1 st	o (3)	\times (0)	o (3)	o (3)		
2 nd	o (2)	o (3)	o (3)	o (3)		
3 rd	o (3)	o (2)	o (3)	o (3)		
4 th	o (2)	o (3)	o (3)	o (3)		
5 th	\times (1)	o (3)	o (3)	o (3)		
6 th	o (3)	o (3)	o (3)	o (3)		
7 th	o (3)	o (2)	o (3)	o (3)		
8 th	o (2)	\times (1)	o (3)	o (3)		
9 th	o (3)	o (3)	o (3)	o (3)		
10 th	o (3)	× (0)	o (3)	o (3)		
11 th	\times (0)	o (3)	o (3)	o (3)		
12^{th}	\times (0)	o (3)	o (3)	o (3)		

Table 6 Accu	mulated of	detection 1	rate of SS	VEP	[%]

	8Hz	10Hz	12Hz	15Hz
$2[s] \sim 4[s]$	33.3	33.3	91.7	75.0
$2[s] \sim 6[s]$	75.0	75.0	100	100

5. 複数の光刺激提示下での SSVEP の識別

(1) 2種の点滅動画による SSVEP の識別実験

実際に SSVEP によって複数のコマンドの選択が可能 であるかを調べるために, 刺激周波数の異なる2種の視 覚刺激の動画を用意し, どちらか一方の動画を注目する ことによって SSVEP が識別できるかどうか実験を行っ た.実験における動画の条件と電極配置、使用する点滅 周波数の種類は4.1節と同じ条件とした.本実験のサン プリング周波数は1kHzとし、画面照度を相対的に強め るために、モニターと被験者の上部に覆いを設けて、図 7のような画面付近が薄暗がりになる環境を用意した. 被験者は椅子に座った状態で顔から画面までの距離が 45~50cmとなるような体勢で実験を行った.



Fig. 7 Experimental environment

また,画面は図8のような配置で動画をループ再生し, 注目させる動画は左側に配置した.なお,この実験は二 日に分けて行った.



Fig. 8 Appearance of the screen under two stimulus presentations

測定開始前は画面を完全に隠した状態にして, 脳波が 落ち着いた時点を測定開始とし, 測定者が任意のタイミ ングで画面の遮蔽物を取り除いた. 画面が完全に露出し た時刻を記録し, 15秒間刺激を与え, 刺激提示後の時刻 を記録し, 測定終了とした. 注目する刺激周波数の動画 とその他の動画の組合せ3種類を1セットとし, 7セッ ト分測定した後, 注目させる刺激周波数の動画を変更し, 同様に測定した.

(2) SSVEP 識別条件

STFT の解析条件や SSVEP の検出条件については 4.1 節と同じとし, EEG データの解析全区間は 10240 点(約 10秒間)とした.解析結果を元に図 6 のようなグラフを 各セット,電極毎に作成し,測定日毎に最も良いデータ と最も悪いデータを取り除き,母数 10 個のデータとし て識別率を求めた.また,SSVEP の識別を自動化するた めに,数値的判断を MATLAB/Simulink のプログラムに よって行った.なお,ある周波数の振幅スペクトルと他 の周波数の振幅スペクトルの大小を判定する際に,振幅 スペクトルの差が 100以上となった時に明確に大小関係 が現れたと判断し,SSVEP 検出のためのカウントに含め ることにした.

(3) 2種の点滅動画による SSVEP の識別実験結果

注目する刺激周波数毎の識別結果を表7に示す.識別 できた場合は〇,識別できなかった場合は×で表し,括 弧内の周波数が誤識別された周波数を表している.表中 の識別率は2~10秒に対してのものである.また,注目 した動画と組み合わせた動画の識別率が80.0%以上であ った場合を〇で示したものを表8に示す.表8において, 縦方向は注目する刺激周波数,横方向は組合せ相手の刺 激周波数である.

表7より,8Hz を除いた10Hz,12Hz,15Hz の組合せ では識別率は80%以上であった.また表8に示す通り, 8Hz が組み合わさると識別率が他の組合せよりも低下す るため,次節の3種の動画によるSSVEPの識別実験で は,10Hz,12Hz,15Hz の動画を用いることにした. Table 7 Distinction results under two stimulus presentations

a)	Stimulus	frequency	8Hz gaze

a) Stillards frequency of the gaze					
	8Hz-10Hz	8Hz-12Hz	8Hz-15Hz		
Day1,1 st	0	\times (10Hz)	0		
Day1,2 nd	\times (12Hz)	0	0		
Day1,3 rd	0	0	0		
Day1,4 th	\times (12Hz)	\times (12Hz)	\times (10Hz)		
Day1,5 th	\times (12Hz)	0	0		
Day2,1 st	\times (12Hz)	\times (10Hz)	\times (12Hz)		
Day2,2 nd	0	0	0		
Day2,3 rd	\times (10Hz)	\times (10Hz)	0		
Day2,4 th	0	0	\times (10Hz)		
Day2,5 th	0	0	0		
Distinction	50.0%	60.0%	70.0%		

b)	Stimulus	frequency	10Hz gaze
	otimarao	mequency	TOTIL Sule

	10Hz-8Hz	10Hz-12Hz	10Hz-15Hz
Day1,1 st	0	0	0
Day1,2 nd	0	0	0
Day1,3 rd	\times (12Hz)	0	0
Day1,4 th	0	0	\times (12Hz)
Day1,5 th	0	0	0
Day2,1 st	0	0	0
Day2,2 nd	\times (15Hz)	\times (12Hz)	0
Day2,3 rd	0	0	0
Day2,4 th	0	0	0
Day2,5 th	\times (12Hz)	0	0
Distinction rate	70.0%	90.0%	90.0%

c) Stimulus frequency 12Hz gaze

	12Hz-8Hz	12Hz-10Hz	12Hz-15Hz
Day1,1 st	\times (8Hz)	0	0
Day1,2 nd	0	0	0
Day1,3 rd	0	0	0
Day1,4 th	0	0	0
Day1,5 th	0	0	0
Day2,1 st	0	0	\times (10Hz)
Day2,2 nd	0	0	0
Day2,3 rd	0	0	0
Day2,4 th	0	0	0
Day2,5 th	0	0	0
Distinction rate	90.0%	100%	90.0%

d) Stimulus frequency 15Hz gaze

	15Hz-8Hz	15Hz-10Hz	15Hz-12Hz
Day1,1 st	0	0	\times (12Hz)
Day1,2 nd	0	0	0
Day1,3 rd	\times (12Hz)	\times (10Hz)	\times (12Hz)
Day1,4 th	0	\times (8Hz)	0
Day1,5 th	0	0	0
Day2,1st	\times (12Hz)	0	0
Day2,2 nd	0	0	0
Day2,3 rd	\times (12Hz)	0	0
Day2,4 th	\times (12Hz)	0	0
Day2,5 th	\times (12Hz)	0	0
Distinction rate	50.0%	80.0%	80.0%

Table 8 Correlation of distinction result for all combinations

	8Hz	10Hz	12Hz	15Hz
8Hz	/	×	×	×
10Hz	×	/	0	0
12Hz	0	0		0
15Hz	×	0	0	/

(4) 3種の点滅動画による SSVEP の識別実験

実際に SSVEP によって複数のコマンドの選択が可能 であるかを調べるために,刺激周波数の異なる3種の視 覚刺激の動画を用意し,一つの動画を注目することによ って SSVEP が識別できるかどうか実験を行った.実験 環境や,測定条件,測定手順は5.1節と同じとした.ま た,画面は図9のような配置で動画をループ再生し,注 目させる動画は上部に配置した.なお,この実験も二日 に分けて行った.SSVEP の検出条件は,5.2節と同じと した.



Fig. 9 Appearance of the screen under three stimulus presentations

(5) 3種の点滅動画による SSVEP の識別実験結果

注目する刺激周波数毎の識別結果を表9に示す. 識別 できた場合は○, 識別できなかった場合は×で表し, 括 弧内の周波数が誤識別された周波数を表している. また, SSVEPを識別できた時において, 刺激提示から2~4秒, 2~6秒, 2~8秒, 2~10秒ごとの SSVEP の累積識別率 を表 10に示す. 表内の数値は百分率表記である.

Table 9 Distinction results under three stimulus presentations

	10Hz gaze	12Hz gaze	15Hz gaze
Day1,1 st	× (15Hz)	0	0
Day1,2 nd	0	0	0
Day1,3 rd	0	0	\times (12Hz)
Day1,4 th	0	0	0
Day1,5 th	0	0	0
Day2,1 st	0	0	0
Day2,2 nd	0	0	\times (12Hz)
Day2,3 rd	0	0	\times (10Hz)
Day2,4 th	0	\times (15Hz)	0
Day2,5 th	\times (12Hz)	0	0

Table 10 Accumulated distinction rate of SSVEP [%]
--

	10Hz gaze	12Hz gaze	15Hz gaze
$2[s] \sim 4[s]$	80.0	80.0	30.0
2[s]~6[s]		80.0	50.0
2[s]~8[s]		90.0	60.0
2[s]~10[s]			70.0

表 10 より, 15Hz の識別率は 2~10 秒間では 70%であ

るが、2~6 秒間では 50%と低かった. 各周波数の識別 率を高くし、かつ均等にするために、15Hz の動画の設 定として、図形の大きさを一回り大きく、また表1から 15Hz の出現率が高い色の組合せとなるように、図形の 色を白、背景色を青に変更し、再度同様の実験を行った. 同様に解析を行い、この変更の下での注目する刺激周波 数毎の識別結果を表 11 に示す. 識別できた場合は〇, 識別できなかった場合は×で表し、括弧内の数字は識別 が行われた時間帯を表している.

	10Hz gaze	12Hz gaze	15Hz gaze
Day1,1 st	o (2~4)	○ (2 ~ 4)	o (2~4)
Day1,2 nd	○ (2 ~ 4)	○ (2 ~ 4)	o (2~4)
Day1,3 rd	○ (2 ~ 4)	○ (2 ~ 4)	o (2~4)
Day1,4 th	○ (2 ~ 4)	○ (2 ~ 4)	o (2~4)
Day1,5 th	○ (2 ~ 4)	○ (2 ~ 4)	o (2~4)
Day2,1 st	○ (2 ~ 4)	○ (2 ~ 4)	o (2~4)
Day2,2 nd	○ (2 ~ 4)	○ (2 ~ 4)	o (2~4)
Day2,3 rd	○ (2 ~ 4)	○ (2 ~ 4)	o (2~4)
Day2,4 th	○ (2 ~ 4)	○ (2 ~ 4)	○ (2 ~ 4)
Day2,5 th	○ (2 ~ 4)	○ (2 ~ 4)	○ (2 ~ 4)
Distinction rate	100%	100%	100%

Table 11 Distinction results after change of animation for 15Hz

全ての解析結果において,注目した刺激周波数が正し く識別された.また,識別は全て 2~4 秒間で行うこと ができた.

これらの実験結果より、単独で 15Hz の視覚刺激動画 を提示した際には早く正確に SSVEP が検出できたが、 他の視覚刺激動画と組み合わせて提示すると互いに干 渉して被験者に影響を与え、識別率が低下することが分 かった.しかしながら、被験者の特性に沿って 15Hz の 視覚刺激動画を修正すると、識別率および識別時間とも に改善できることが確認できた.

3種の点滅動画によるランダム注視実験 (1)実験条件と実験手順

刺激周波数の異なる3種の視覚刺激の動画を用意し、 一つの動画を注目することによって SSVEP が識別でき るかどうか実験を行った.実験環境や、測定条件は5.1 節と同じとした.また、動画の設定は5.5節の変更後の 設定を適用し、画面は図10のような配置で動画をルー プ再生し、15Hzの動画を上部に、10Hzを左側、12Hzを 右側に配置した.



Fig. 10 Appearance of final screen

実験ではあらかじめ,注目する刺激周波数 10Hz, 12Hz, 15Hz がランダムかつ 10 個ずつになる指示表を作成した. 測定開始前は画面を完全に隠した状態にして,脳波が落 ち着いた時点を測定開始とし,測定者が指示表に従い任 意のタイミングで被験者に注目させる周波数を告知し, 3 秒後に画面の遮蔽物を取り除いた.これは被験者の体 動などによるノイズが混入しないようにするためであ る.画面が完全に露出した時刻を記録し,15 秒間刺激を 与え,刺激提示後の時刻を記録し,測定終了とした.こ の手順を各周波数 10 個,計 30 個測定した.SSVEP の検 出条件は,5.2 節と同じとした.

(2) 3種の点滅動画によるランダム注視実験結果

注目する刺激周波数毎の識別結果を表 12 に示す.識別できた場合は〇,識別できなかった場合は×で表し,括弧内の周波数が誤識別された周波数を表している.また,SSVEPを識別できた時において,刺激提示から2~4秒,2~6秒ごとのSSVEPの累積識別率を表13に示す.表内の数値は百分率表記である.

	10Hz gaze	12Hz gaze	15Hz gaze
1^{st}	0	0	0
2^{nd}	0	0	0
3^{rd}	0	0	0
4^{th}	0	0	0
$5^{ m th}$	0	0	0
6^{th}	0	0	0
$7^{ m th}$	0	0	0
8^{th}	0	imes (10Hz)	0
9^{th}	\times (15Hz)	0	0
$10^{\rm th}$	0	0	0

Table 12 Distinction results under three stimulus

Table 13 Accumulated distinction rate of SSVEP by random

	10Hz gaze	12Hz gaze	15Hz gaze
$2[s] \sim 4[s]$	70.0	70.0	100
2[s]~6[s]	90.0	90.0	

表13より,全ての刺激周波数に対して2~6秒間で識 別率は90.0%以上となっており,ランダムに注視しても 識別率は高く,早く識別できている.この結果から, SSVEPによって3種のコマンドの選択が可能であると 考えられる.

7. 結論

本研究では、BMI に使用できる脳波解析の基礎研究と して、定常状態視覚誘発電位(SSVEP)を短時間で検出 する方法を考えた.予備実験を行い、視覚刺激として与 える点滅図形を白い四角、背景色を黒、使用する電極数 を3個とした.また、SSVEPを検出するための脳波の解 析手法、及び検出条件を定め、8Hz、10Hz、12Hz、15Hz で点滅する刺激動画を用いて、SSVEPの検出実験を行っ た.6秒間での各周波数の検出率は75~100%となり、特 に高周波数に対する検出率が高かった.また2種の動画 を用いての識別実験では、8Hz を除いた 10Hz、12Hz、 15Hz の組合せでは 80%以上の識別率であった.

この結果に基づいて,これらの周波数を視覚刺激とす る3種の動画による識別実験を行ったところ,15Hzの 識別率が低かったため,15Hzのみ視覚刺激における図 形の大きさを一回り大きく,背景色も変更したところ, 全ての刺激周波数に対する識別率が2~4秒間で100%と なり,改善された.最後に,各動画の配置を固定した状 態で3種の動画によるランダム注目実験を行ったところ, 識別率は2~6秒の間で90.0%となった.これより, SSVEPによって3種のコマンドの選択が可能であると 考えられる.

しかし,提案した SSVEP の識別方法を電動車椅子の BMI として使用するためには,走行時や体動などのノイ ズの除去が必要となるため,ノイズの除去を含めたより 頑健な識別方法が必要である.また,提案した SSVEP の識別方法を用いれば,被験者の特性に対応した視覚刺 激の設定を行った上で,様々な機器を操作する BMI と して利用できる可能性がある.

参考文献

- S.-P., Kim, J. D. Simeral, L. R. Hochberg, J. P. Donoghue, G. M. Friehs, and M. J. Black, "Multi-state decoding of point-and-click control signals from motor cortical activity in a human with tetraplegia,", Proc. of the 3rd International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering, pp. 486~489, 2007.
 L. R. Hochberg, at el., "Neuronal ensemble control of prosthetic
- L. R. Hochberg, at el., "Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia", Nature Vol.442, pp.164-171, 2006.
- 3) M. Hajibabazadeh, V. Azimirad, "Brain-Robot interface: distinguishing left and right hand EEG signals through SVM", Proceeding of the 2nd RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics, October 15-17,2014, Tehran, Iran
- 4) T. Noda, N. Sugimoto, J. Furukawa, M. Sato, S. Hyon, J. Morimoto, "Brain-Controlled Exoskeleton Robot for BMI Rehabilitation", Humanoid Robots (Humanoids), 12th IEEE-RAS International Conference,pp21-27, 2012
- 5) M. Mano and G. Capi, "Adaptive navigation of a brain controlled robotic wheelchair in an indoor environment", Proc. of the 2013 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, No.13-2, 2013.
- 茨木仁希,中村恭之, "脳信号収集ワイヤレスヘッドセットを 用いた電動車椅子ロボットの制御", Proceedings of the 2013 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, No.13-2, 2013.
- 7) T. Jiralerspong, C.Liu, J.Ishikawa, "Identification of Three Mental States Using a Motor Imagery Based Brain Machine Interface", Computational Intelligence in Brain Computer Interfaces (CIBCI), 2014 IEEE Symposium
- 8) 板井陽俊,船瀬新王, "BCI システムの構築を目指した単一試 行脳波の解析技術",日本神経回路学会誌, vol.9, No.3, pp.118-125, 2012.