

A High-Speed Brain Speller Using Steady-State Visual Evoked Potentials

佐藤純一

2016年9月26日

A HIGH-SPEED BRAIN SPELLER USING STEADY-STATE VISUAL EVOKED POTENTIALS,
M. NAKANISHI, *International journal of neural systems* 24.06, 2014

- Mixed-coded SSVEPs
- SSVEPによるBCIの性能が大きく向上
 - c-VEPの性能を上回る
- 近年注目された論文
 - 37件の引用 (google scholar)

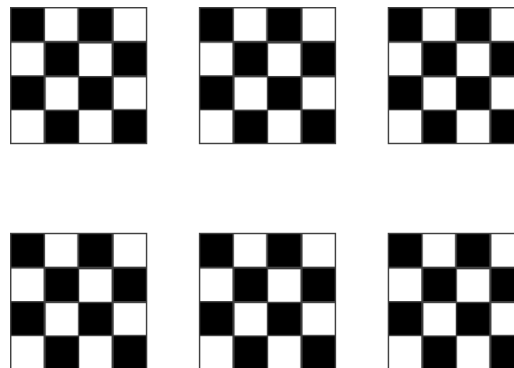
BCIについて

- 過去数十年の中でBCIのパフォーマンスは著しく向上する一方まだ幅広い応用に至るレベルには達していない
- P300やVEPによるBCI
 - 多くのコマンド数(30コマンド以上)と高い通信速度を実現

論文名	種類	ターゲット	性能	年
			10-bits/min	2000頃
Talking off the top of your head - toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials, Electroencephalogr.	P300	36 targets (6 x 6 matrix)	5 characters/min	1988
Optimized stimulus presentation patterns for an event-related potential EEG- based brain-computer interface	P300	84 targets (12 x 7 matrix)	35 bits/min	2011
Rapid Communication with a "P300" Matrix Speller Using Electrographic Signals (ECoG).	P300 (ECoG, 侵襲式)	36 targets (6 x 6 matrix)	69 bits/min 最大 113 bits/min	2011
SSVEP-based brain-computer interface using a canonical correlation analysis method	SSVEP	6-targets	58 bits/min	2009
A high-ITR SSVEP based BCI speller	SSVEP	8-targets	105 bits/min	2014
A high-speed BCI based on code modulation VEP	c-VEP	32-targets	144 bits/min	2011
This study	SSVEP	32-targets	166 bits/min	2014

SSVEP

- 各ターゲットに異なる周波数のコマンドが割り当てられる
- ターゲット数がディスプレイのリフレッシュレートに制限
- 多くのSSVEP-based BCIのITRは60 bits/minを下回る
- (執筆時) 最大で105 bits/min



本研究

- Mixed frequency and phase coding (周波数-位相混合符号化方式)
 - Hybrid coding approaches
 - ターゲット数の増加

視覚刺激

視覚刺激の生成

- コンピュータのモニタを用いる
- 白と黒のフレーム入れ替えることで刺激を生成

周波数の制約

- いくつかの周波数は生成不可能
 - 例えば, 11Hzの視覚刺激は2.73フレームごとに入れ替える必要がある
- 近似的アプローチがWang et al.[1] により提案 (スライドp6 (1)の位相なし版)
 - 近似した11 Hzは “1110001110011100011100111...” となる
 - 近似的アプローチによるSSVEPは位相と潜時が安定すると報告[2]
 - 位相領域への拡張を示唆

[1] Y. Wang, Y. T. Wang and T. P. Jung, Visual stimulus design for high-rate SSVEP BCI, Electron. Lett. 46(15) (2010) 1057-1058.

[2] M. Nakanishi, Y. Wang, Y. T. Wang, Y. Mitsukura and T. P. Jung, Generating visual flickers for eliciting robust steady-state visual evoked potentials at flexible frequencies using monitor refresh rate, PLoS One, accepted.

刺激系列

- 周波数のみではなく、位相を考慮する

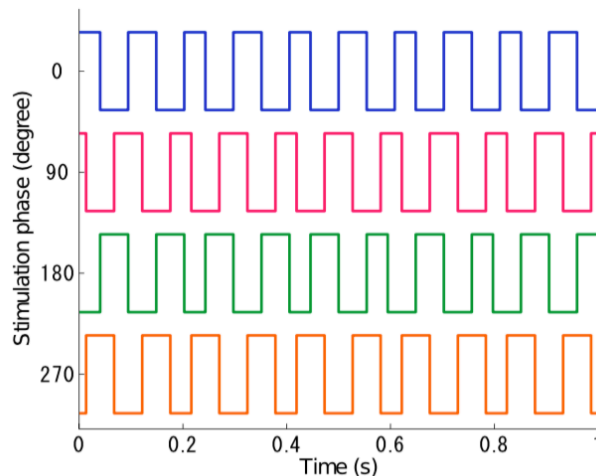
$$S(f, \phi, i) = \text{square} \left[2\pi f \left(\frac{i}{\text{RefreshRate}} \right) + \phi \right] \quad (1)$$

- f : 視覚刺激の周波数
- i : フレームインデックス
- ϕ : 初期位相
- $\text{square}[]$: 矩形波 $([0, 1])$ を生成する関数

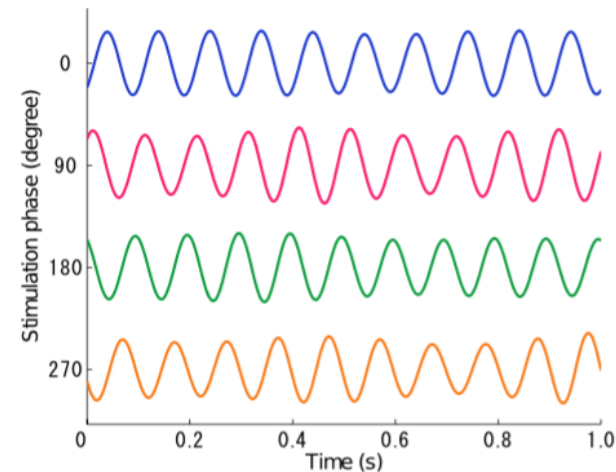
- 4-位相符号化信号

- 0, 90, 180, 270度
- 10 Hz (75 Hzのリフレッシュレート)

$$\text{square}(x) = \text{sign}(\sin(x))$$

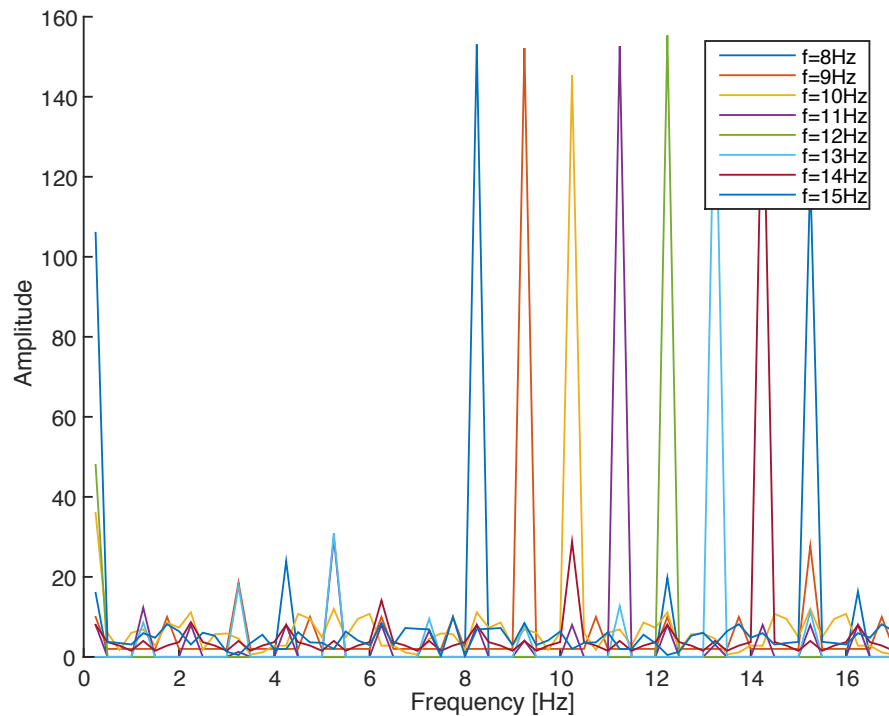


刺激信号

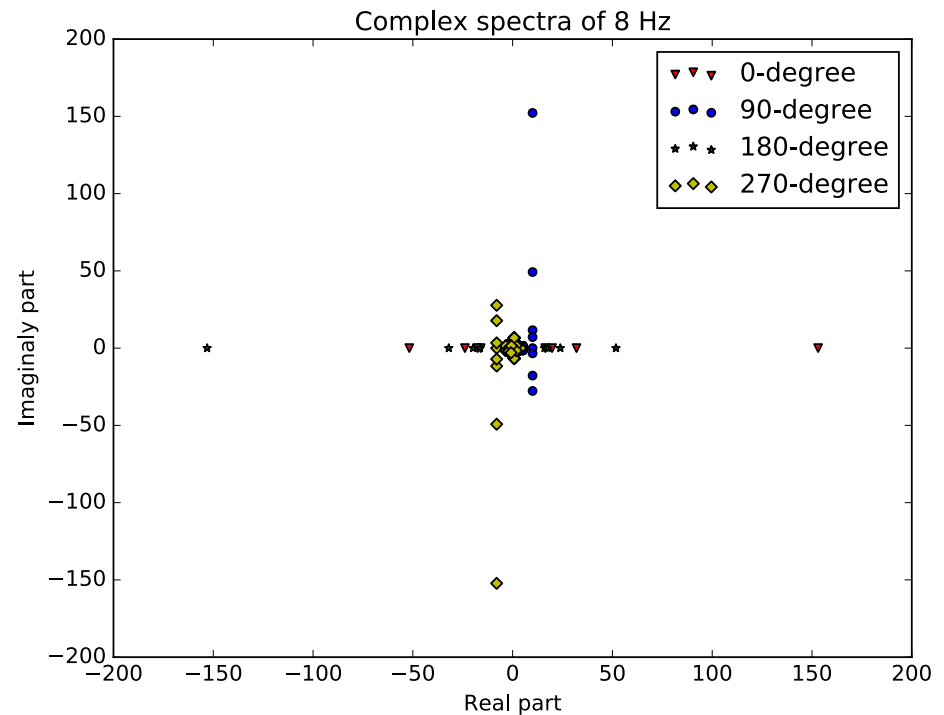


SSVEPのデコード信号

刺激系列 スペクトル



Target 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8の刺激系列の
周波数スペクトル



8Hzの刺激系列の
複素平面上のスペクトル

Target Identification

- Mixed frequency and phase coded SSVEP (Mixed-coded SSVEP)では
 1. 周波数推定
 2. 位相推定

の2 Stepでターゲットの推定を行う

- CCA(canonical correlation analysis)により周波数と位相を推定する
- 位相の決定のためにトレーニングデータを用いる必要がある
- 本研究では大きく2つの手法を提案
 - 手法1 standard CCA based method
 - 従来のCCAを素直に拡張
 - 実験結果 M1に対応
 - 手法2 CCA with SSVEP training data (combine decision)
 - メインの手法
 - 実験結果 M5に対応

手法1 : Standard CCA-based method

CCA

- 2つの多変量変数の線形性を図るための統計的な手法
- 多次元変数 \mathbf{X}, \mathbf{Y} は重み $\mathbf{W}_X, \mathbf{W}_Y$ を用いてそれぞれ $\mathbf{x} = \mathbf{X}^T \mathbf{W}_X, \mathbf{y} = \mathbf{Y}^T \mathbf{W}_Y$ と表すことができる
- CCAは以下の相関を最大にする重みを見つける

$$\max_{\mathbf{W}_X, \mathbf{W}_Y} \rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{E[\mathbf{W}_X^T \mathbf{X} \mathbf{Y}^T \mathbf{W}_Y]}{\sqrt{E[\mathbf{W}_X^T \mathbf{X} \mathbf{X}^T \mathbf{W}_X] E[\mathbf{W}_Y^T \mathbf{Y} \mathbf{Y}^T \mathbf{W}_Y]}} \quad (2)$$

本研究

- \mathbf{X} : マルチチャンネルEEG, row : electrode, column sample
- \mathbf{Y} : リファレンス信号

$$\mathbf{Y}_f = \begin{bmatrix} \sin(2\pi f n) \\ \cos(2\pi f n) \\ \vdots \\ \sin(2\pi N_h f n) \\ \cos(2\pi N_h f n) \end{bmatrix}, \quad n = \frac{1}{f_s}, \frac{2}{f_s}, \dots, \frac{N}{f_s}$$

- f : ターゲット周波数, N_h : 調和周波数の数

リファレンス信号とSSVEPの相関が最大となったときの周波数を選択する

手法1 : 位相の決定

- 位相スペクトル $\phi_x[f]$ は次式で与えられる

$$\phi_x[f] = \text{angle} \left[\sum_{n=1}^N x[n] e^{-\frac{j2\pi f n}{N}} \right]$$

- $x[n]$: CCAによる空間フィルタ適用後EEG
 - N : データ点数
- 訓練データから初期位相 $\phi_{\hat{X}_k}[f_k]$ を求める
 - k : ターゲット番号 ($k = 1, \dots, 32$)
 - f_k : ターゲットの周波数に対応するインデックス
 - \hat{X}_k : トレーニングデータの平均 (CCA適用)
- CCAによって推定した周波数に対応する f^* からテスト信号 x の位相 $\phi_x[f^*]$ を求める
- 以下の式で位相の推定を行う

$$\underset{k}{\operatorname{argmin}} |\phi_x[f^*] - \phi_{\hat{X}_k}[f^*]|$$

ただし k は推定した周波数を持つターゲット番号に限定

手法2 : CCA with SSVEP training data

X_k : SSVEPトレーニングデータ ($k = 1, 2, \dots, K$)

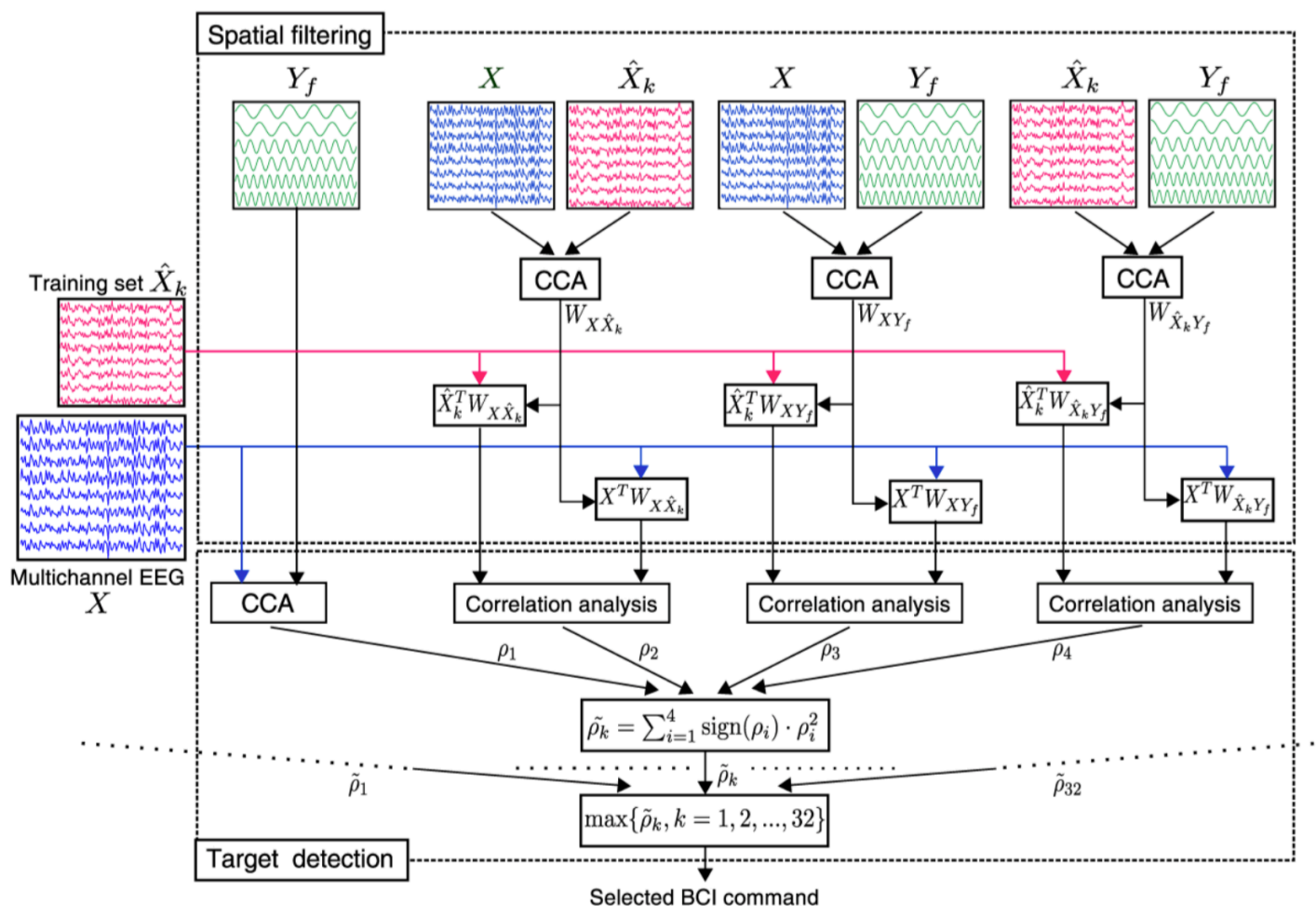
\hat{X}_k : トレーニングデータの平均

X : テストデータ

$W_{X\hat{X}_k}$: CCA(X と \hat{X}_k)の X の重み

W_{XY_f} : CCA(X と Y_f)の X の重み

$W_{\hat{X}_k Y_f}$: CCA(\hat{X}_k と Y_f)の \hat{X}_k の重み



手法2 : Combine decisions

- 相関ベクトルを以下のようにして定義する

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho(X^T W_{X\hat{X}}, \hat{X}^T W_{X\hat{X}}) \\ \rho(X^T W_{XY}, \hat{X}^T W_{XY}) \\ \rho(X^T W_{\hat{X}Y}, \hat{X}^T W_{\hat{X}Y}) \end{bmatrix}$$

- $\rho(a, b)$: a と b とのピアソン相関係数
- ターゲットの識別のために重み付き相関係数 $\tilde{\rho}$ を用いる

$$\tilde{\rho} = \sum_{i=1}^4 \text{sign}(\rho_i) \cdot \rho_i^2$$

- $\text{sign}()$ は負の相関を判別するために用いる
 - e.g. 0 degree vs 180 degrees, 90 degrees vs 270 degrees

実験

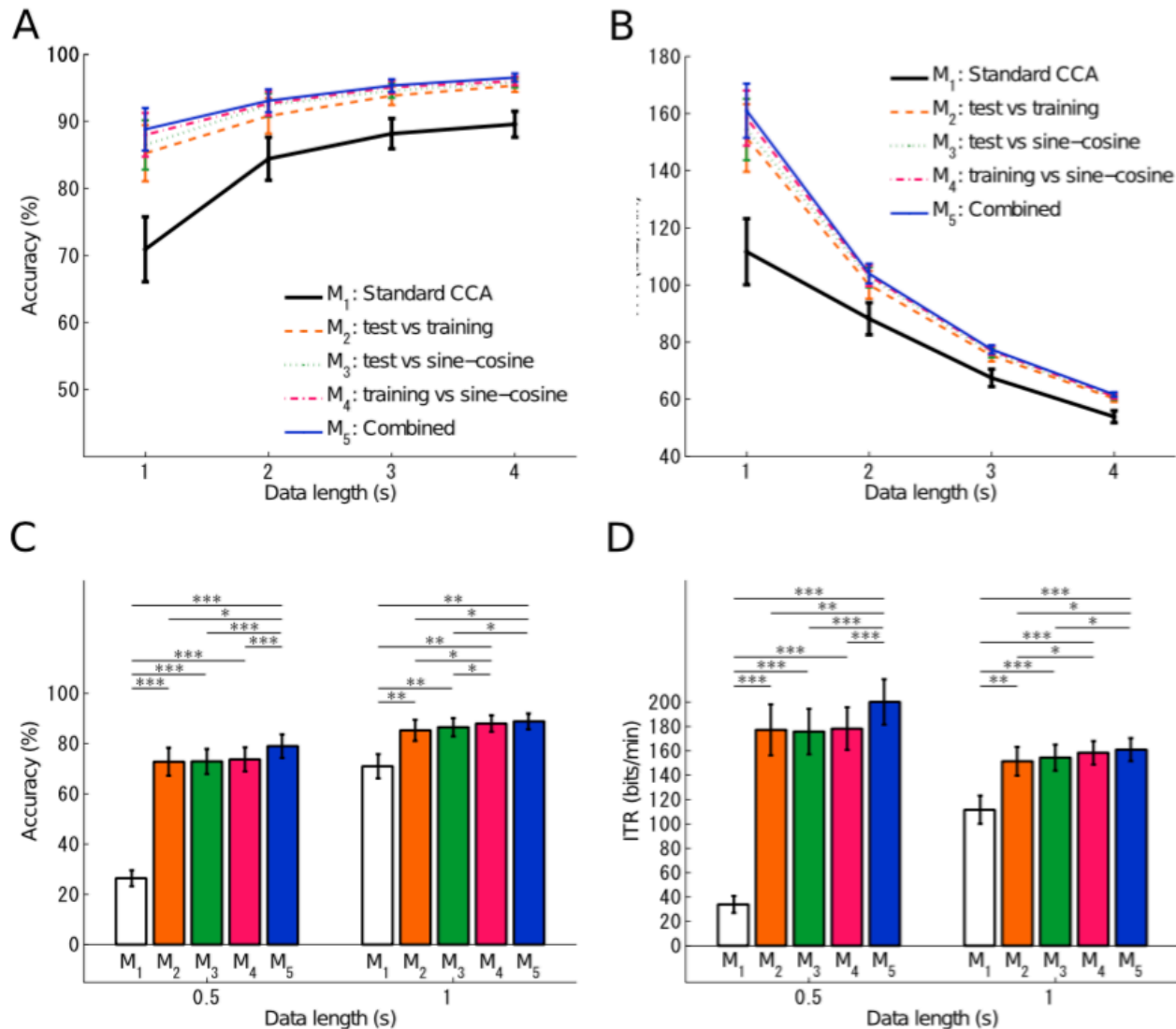
比較

- M1 : ρ_1 のみ, standard CCA-based method
- M2 : ρ_2 のみ, テストとトレーニングの空間フィルタ
- M3 : ρ_3 のみ, テストとsine-cosineリファレンスの空間フィルタ
- M4 : ρ_4 のみ, トレーニングとsine-cosineリファレンスの空間フィルタ
- M5 : ρ , combined decision, (手法2)

環境

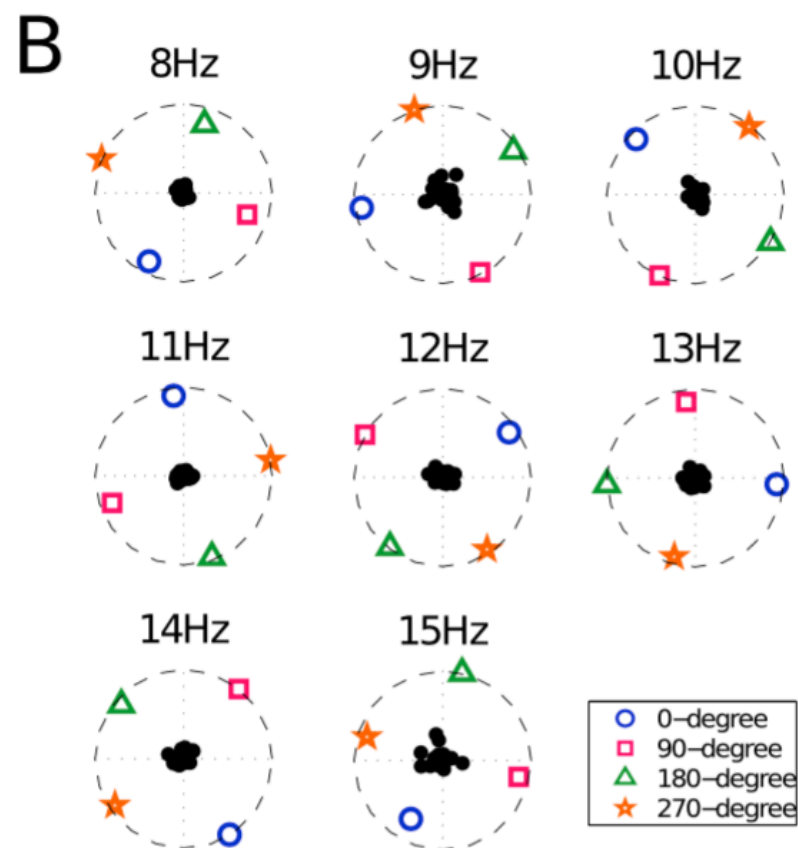
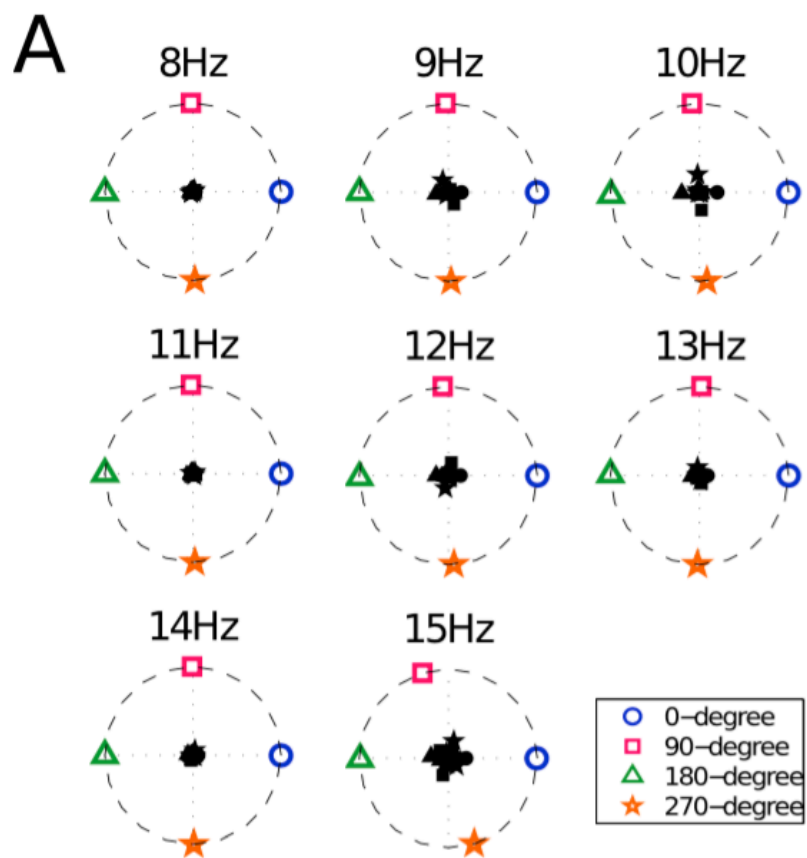
- 被験者13人 (男10人, 女3人)
- 高調波の数 $N_h = 3$
- オフライン
- ランダムに提示されるターゲットを32回, 4秒間注視 (インターバル0.5秒) x 7セット

結果 識別率とITR



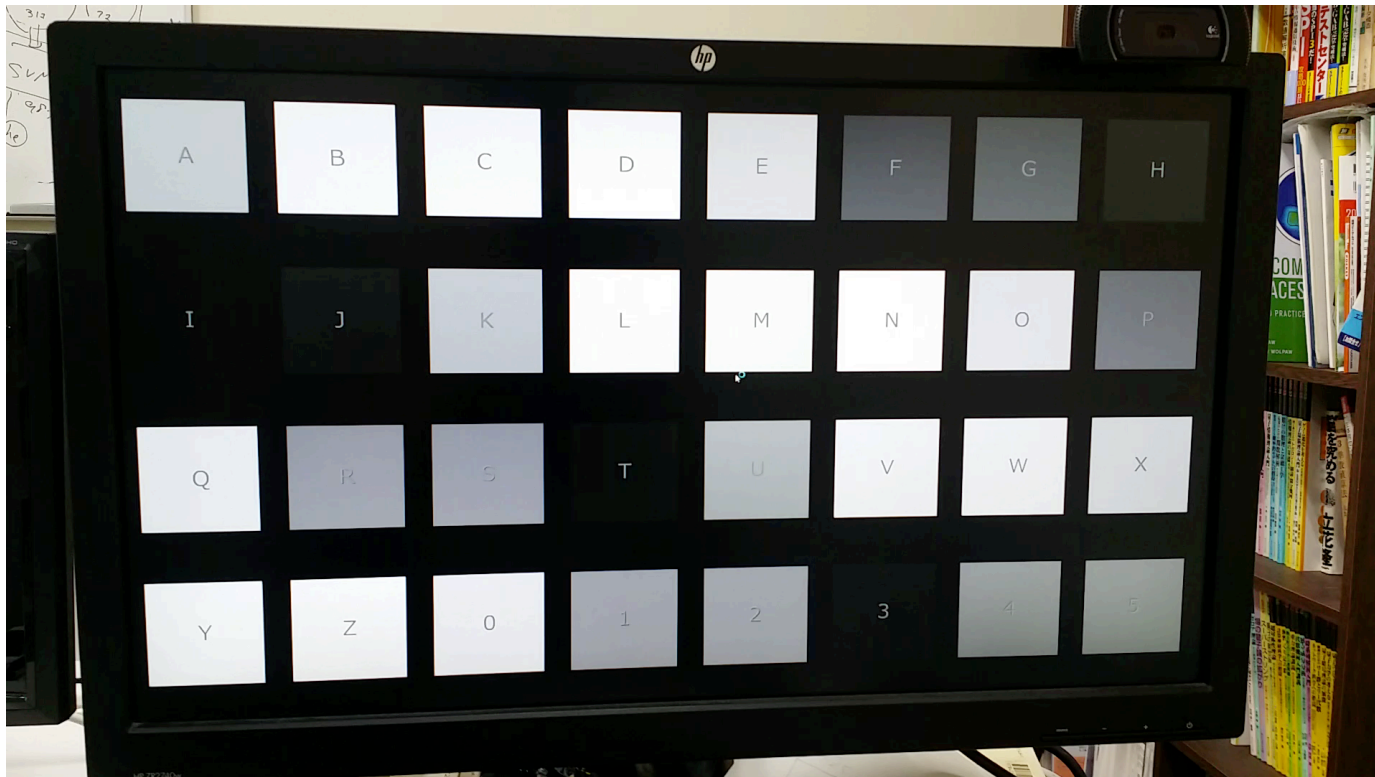
- *: $p < 0.05$, **: $p < 0.005$, and ***: $p < 0.0005$

- A : 刺激系列の複素スペクトラム
- B : すべての被験者で加算平均したSSVEPの複素スペクトラム



追実験

- 中心に文字が書かれた白と黒の画像を交互に提示
 - c-VEPとの比較実験のため
- 注視文字を1秒のインターバル時にランダムに指定, 4秒間注視する
- 64文字（各文字2回ずつ） x 2セット



視覚刺激配置（配置番号）

- 今後c-VEPと比較を行うため、c-VEP BCIの配置と合わせる

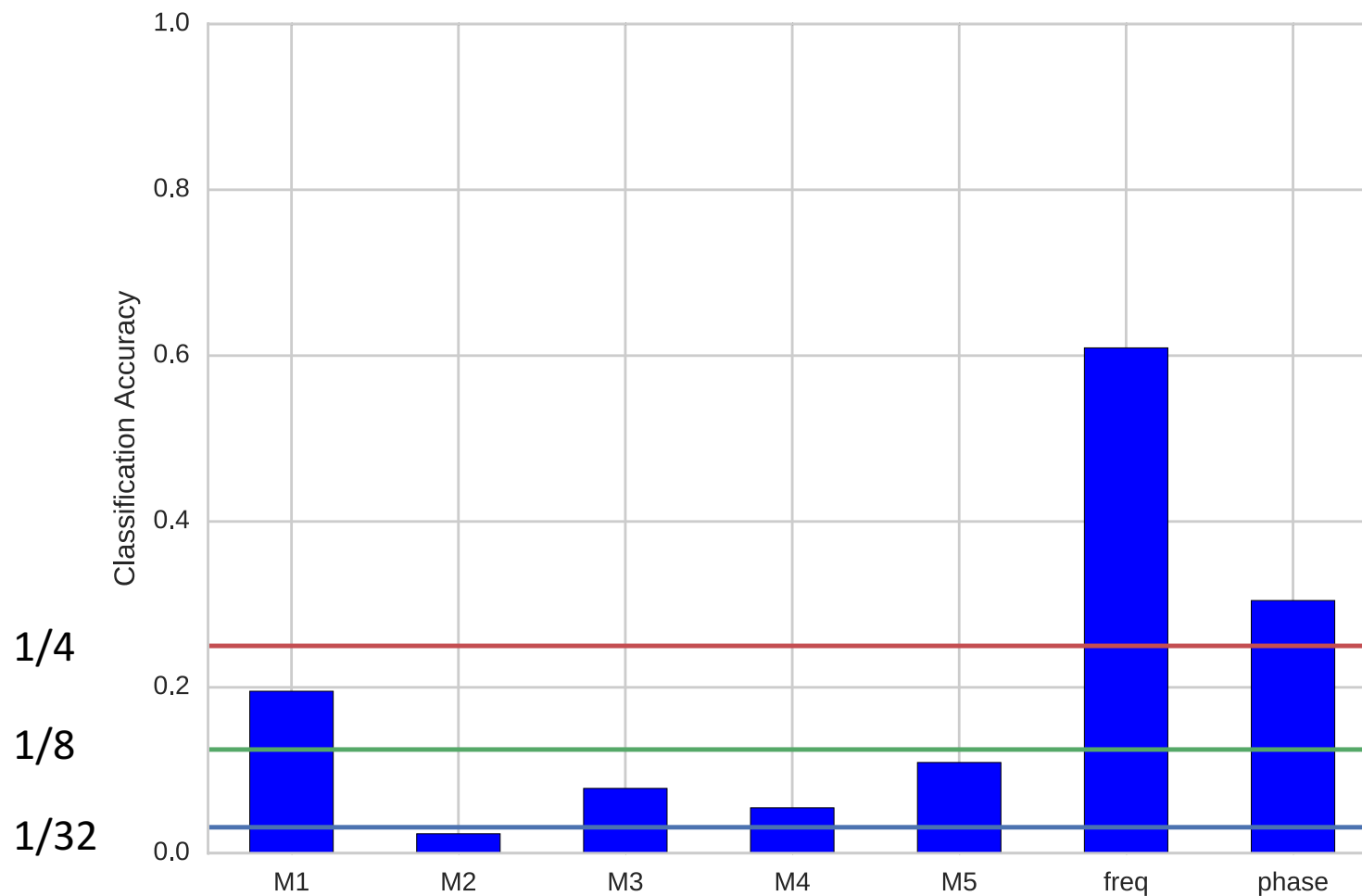
		Frequency (Hz)							
		8	9	10	11	12	13	14	15
Phase (Degree)	0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
	90	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
	180	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24
	270	T25	T26	T27	T28	T29	T30	T31	T32

視覚刺激配置 (配置文字)

		Frequency (Hz)							
		8	9	10	11	12	13	14	15
Phase (Degree)	0	A	B	C	D	E	F	G	H
	90	I	J	K	L	M	N	O	P
	180	Q	R	S	T	U	V	W	H
	270	Y	Z	0	1	2	3	4	5

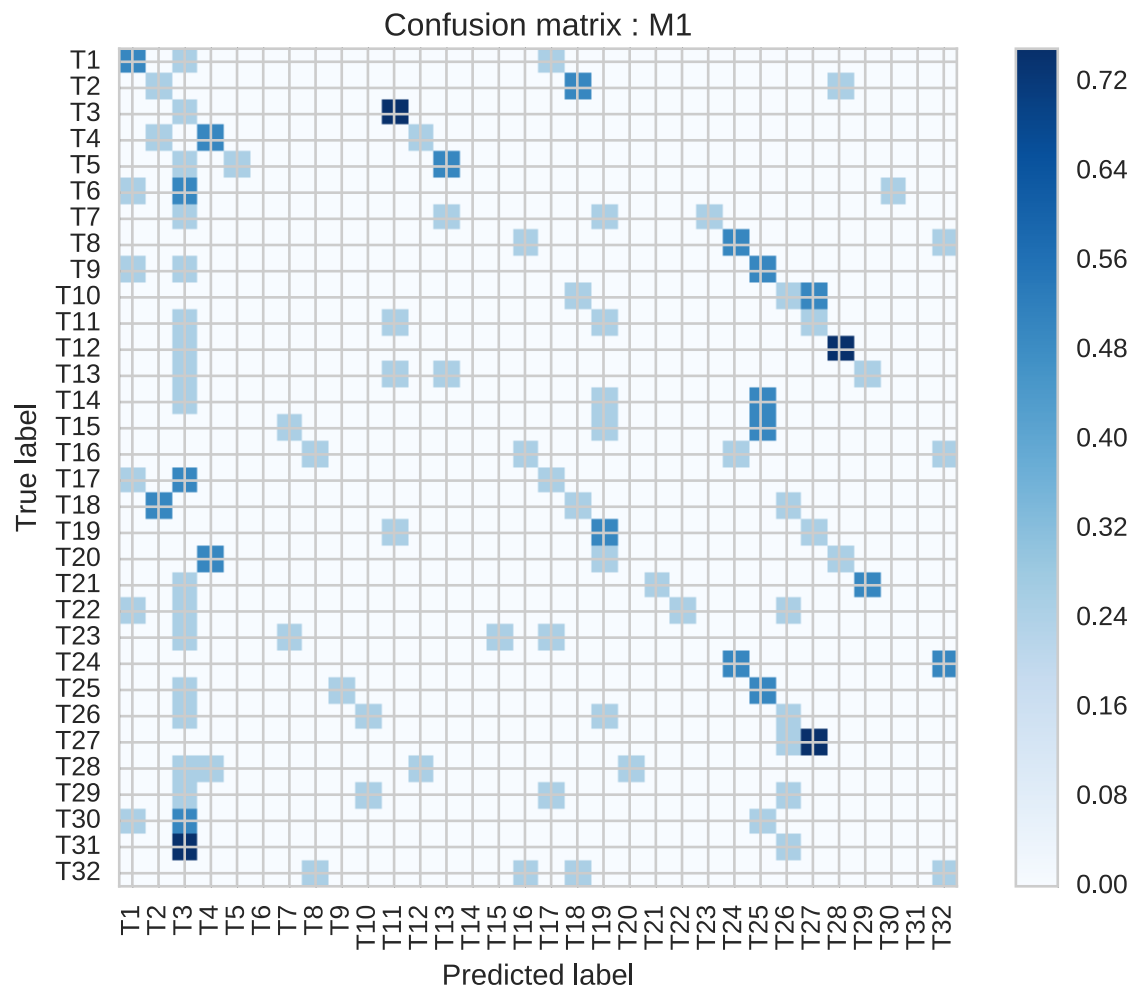
追実験 識別率

- 4秒間のデータを用いて識別



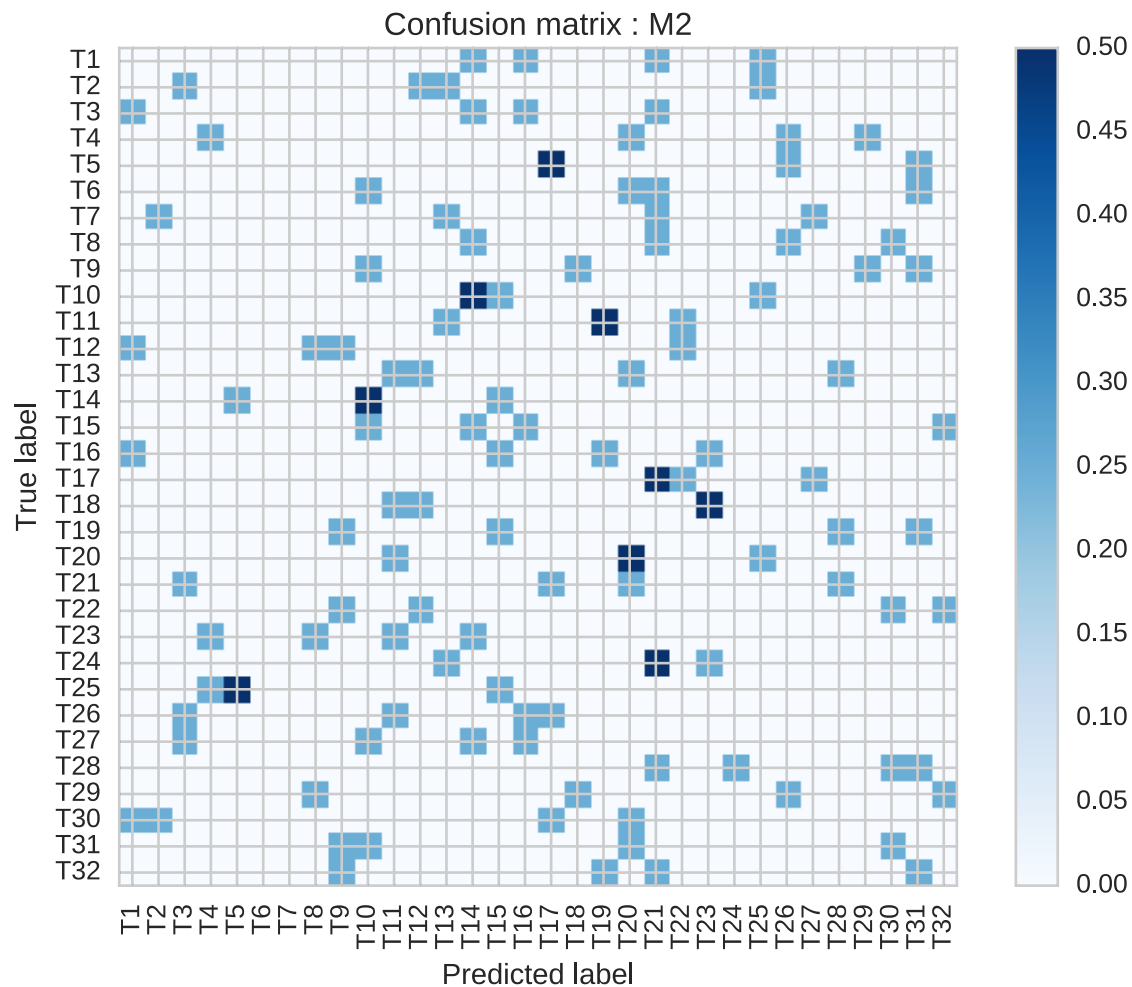
M1の識別結果

- 位相の推定ミスが多い（+8の倍数のターゲットに誤識別）
- T3に予測が偏っている



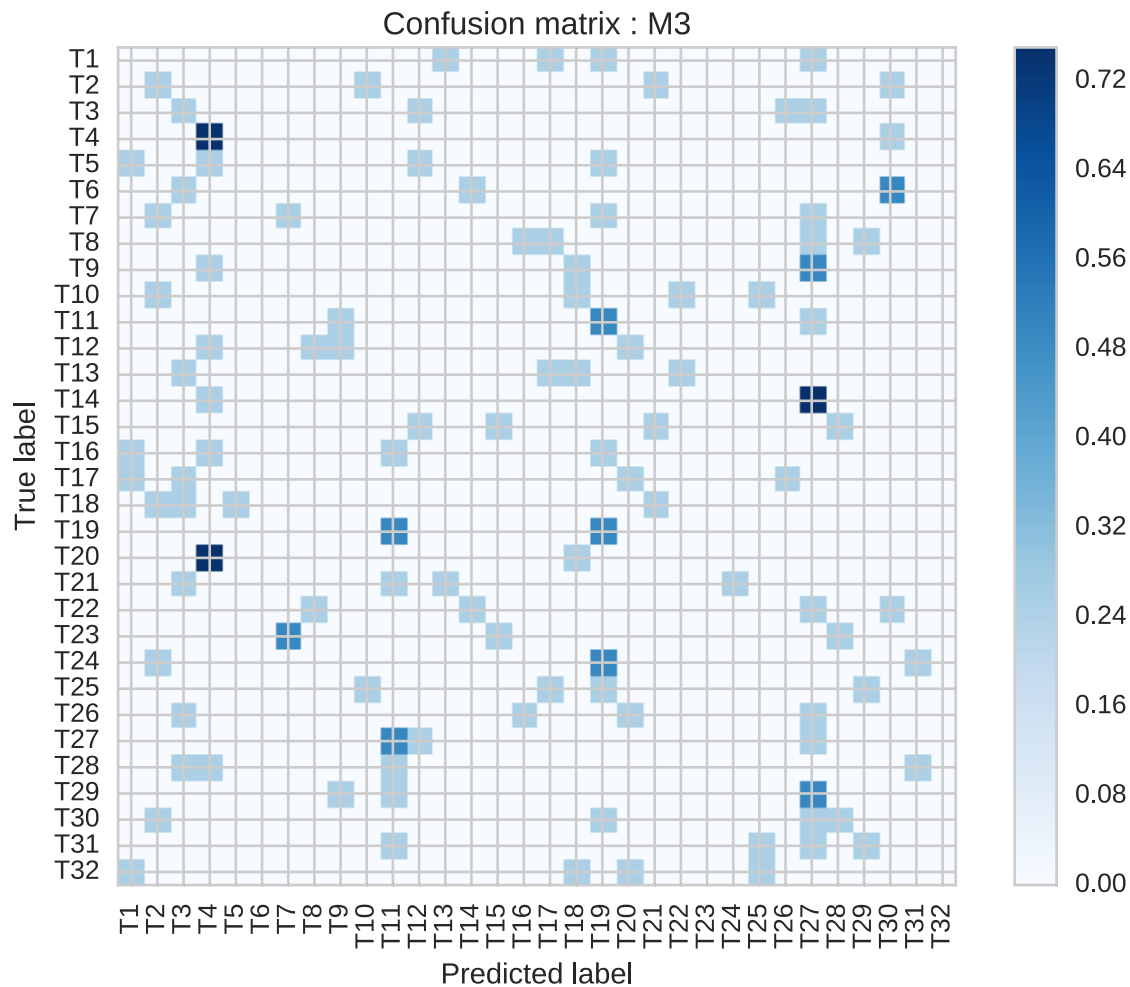
M2の識別結果

- 傾向が見られない



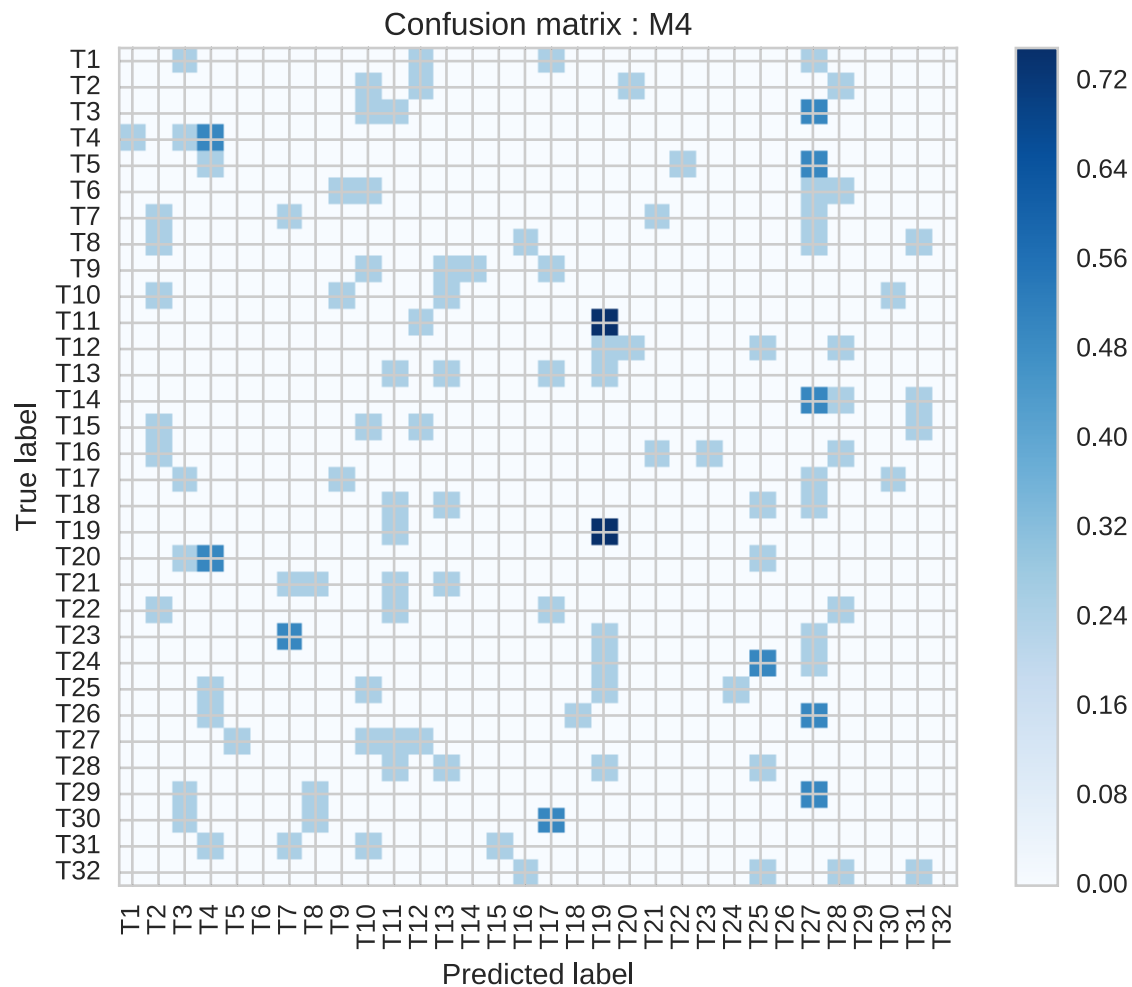
M3の識別結果

- 周波数の推定が成功しているターゲットが存在



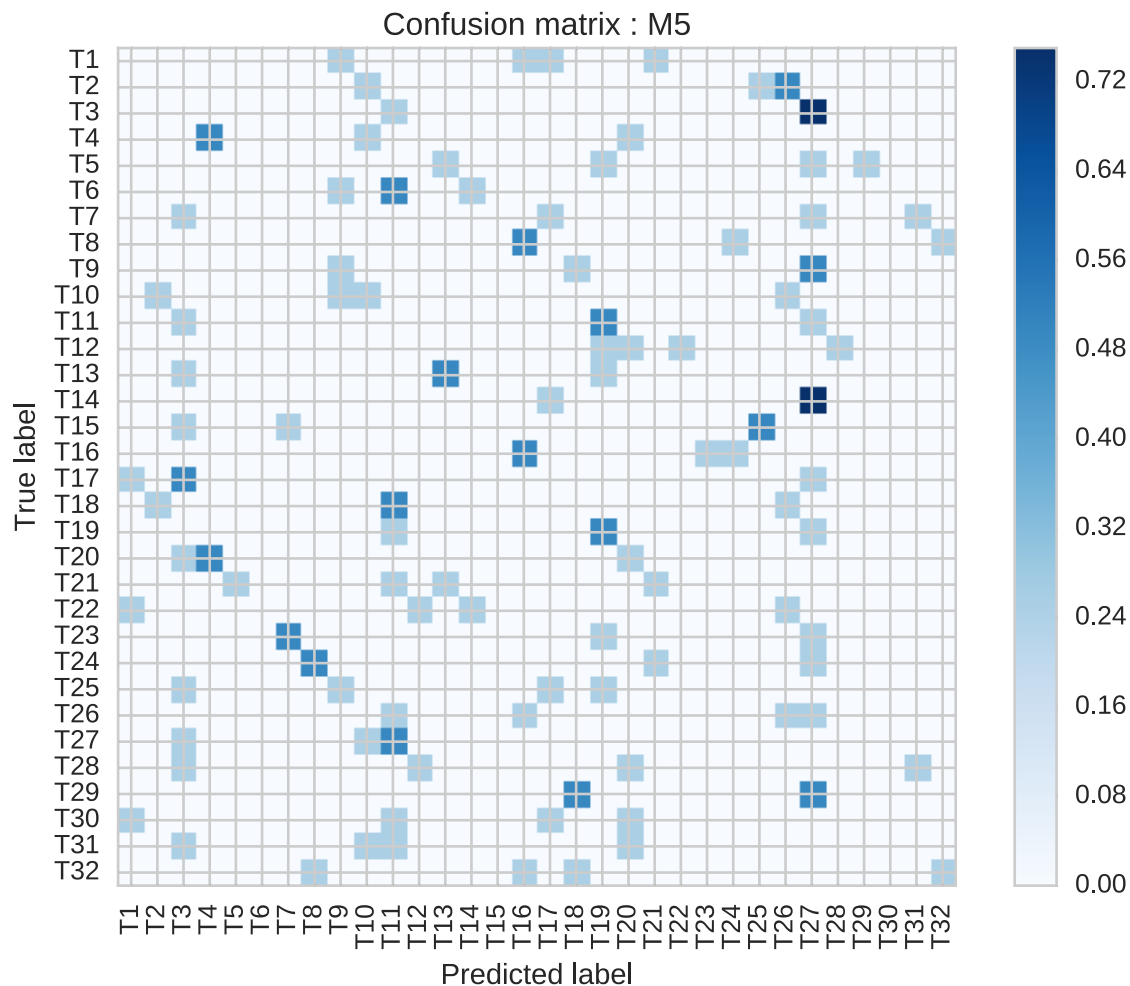
M4の識別結果

- M2同様，傾向が見られない



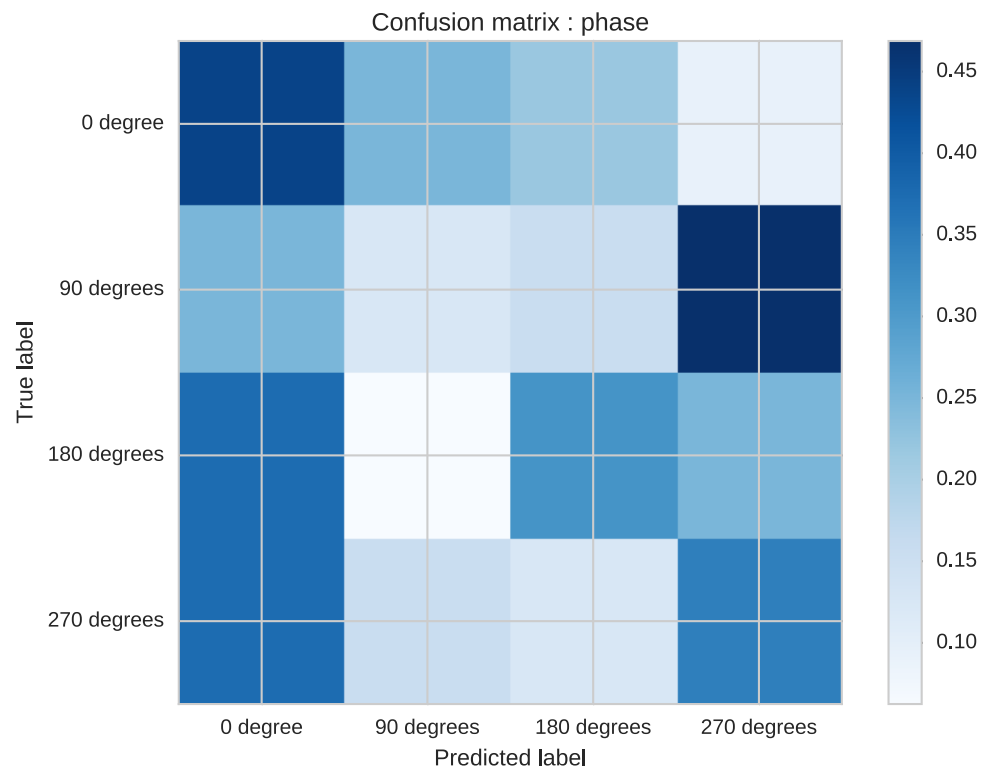
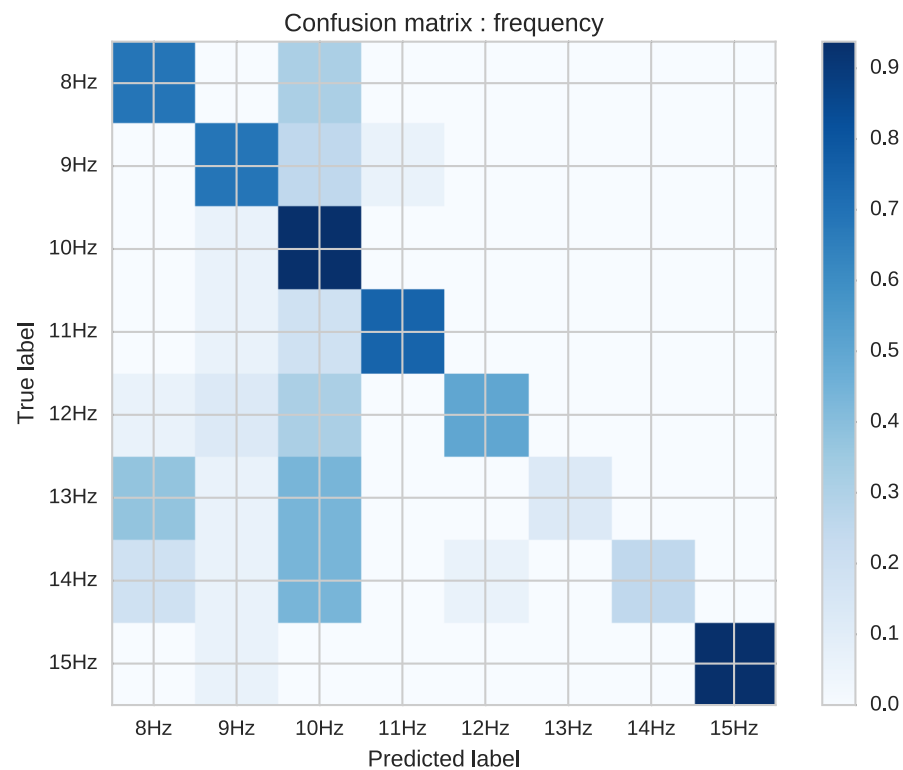
M5の識別結果

- M1の傾向（周波数の推定が成功）を残しているが、精度の悪いM2~M4とのアンサンブルなのでM1より性能は低下



周波数, 位相のみの識別結果

- 10Hzと予測してしまうことが多い
- 位相はランダムにミスが発生している



- トレーニングデータが足りない
 - Leave one outで1クラスにつき4回分の加算平均
予測ラベルについては3回分の加算平均のみ
 - M2, M4とトレーニングデータを用いた空間フィルタの性能が特に悪かった
 - 加算平均信号の位相が意図したものになっていない
 - 例 [-167.72992049 26.37107507 -2.15869147 40.37272531]
 - [0, 90, 180, 270]のように90度ずつ遅れてほしい
- 刺激画像がチェッカーボードではない
- 電極配置が悪い
 - 追実験の電極配置
 - F3, FZ, F4, CZ, P1, PZ, P2, PO3, POZ, PO4, PO3, O1, OZ, O2, PO8, CPZ
 - 論文に合わせたが、過去のc-VEPではVEPの発生箇所のみ配置
 - 過去 P1, PZ, P2, PO3, POZ, PO4, PO7, O1, OZ, O2, PO8, PO9, O9, IZ, O10, PO10

まとめ

- 周波数と位相を利用したMulti-coded SSVEPの提案
- 位相を使う場合は訓練データが必要
- 複数のCCAによる空間フィルタを組み合わせることで、性能が向上
 - c-VEPのITRを上回った
- 追実験では周波数の推定は成功したが、位相の推定は失敗した

今後の予定

- M2はc-VEPのテンプレートマッチングとほぼ同じ,
c-VEPでも識別が可能かを確認
 - 前回のc-VEP実験は1年以上前
- 刺激画像をチェッカーボードに変更して実験
- c-VEPとの比較実験
 - 過去に提案した空間フィルタとのMixed-coded SSVEPとの比較
 - 論文間のITRを比較しているが,
被験者や環境によってITRは変化するため同一条件で実験を行う
- Mixed-SSVEP, c-VEPのオンライン実験
 - Open BCI