

選択的刺激呈示法による注視点非依存な P300-based Brain-Computer Interface の判別速度改善に関する検討

横井 貴紀[†] 高橋 弘武[†] 吉川 大弘^{††} 古橋 武^{††}

[†] 名古屋大学 大学院工学研究科 計算理工学専攻 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

E-mail: †{yokoi,takahashi}@cmplx.cse.nagoya-u.ac.jp, ††{yoshikawa,furuhashi}@cse.nagoya-u.ac.jp

あらまし 従来の P300-based Brain-Computer Interface では、刺激呈示用として、行列型に文字やコマンドを配列したインターフェースが多く用いられてきた。このインターフェースでは、入力したいコマンドや文字に注意を向けるため、注視点の移動が必要になる。しかし被験者によっては注視点の移動が困難な場合も考えられるため、望ましくない。この問題に対して、Rapid Serial Visual Presentation (RSVP) という手法が提案されているが、この手法では、文字を 1 つずつ呈示するため、判別に時間がかかるという問題点が挙げられている。本稿では、RSVP と従来のインターフェースの性能比較を行う。さらに、信頼度に基づく選択的刺激呈示を適用することによる、速度の改善についても検討を行う。

キーワード BCI, P300, 注視点非依存, 高速逐次視覚呈示, 選択的自動再送要求

A Study on Improvement of Classification Time of Gaze Independent P300-based Brain-Computer Interface using Selective Stimulus Presentation

Takanori YOKOI[†], Hiromu TAKAHASHI[†], Tomohiro YOSHIKAWA^{††}, and Takeshi FURUHASHI^{††}

[†] Dept. of Computational Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan

E-mail: †{yokoi,takahashi}@cmplx.cse.nagoya-u.ac.jp, ††{yoshikawa,furuhashi}@cse.nagoya-u.ac.jp

Abstract In conventional P300-based Brain Computer Interface, interface where characters or commands are matrix-arrayed has been used for stimulus presentation. However, in this interface, the movement of viewpoint is needed because of pointing to character or command which a user wants to input, and this movement of viewpoint could be serious problem for some subjects. To solve this problem, Rapid Serial Visual Presentation (RSVP) is proposed. However, classification time will increase, because it presents the characters one by one in this method. This paper compares the performance of RSVP and the conventional interface. Moreover, it applies the degree of reliability based selective stimulus presentation to RSVP, and studies on the improvement of classification time.

Key words BCI, P300, gaze independent, rapid serial visual presentation, automatic repeat request

1. はじめに

Brain Computer Interface (BCI) は、思考を行うだけで、外部機器の操作を可能にするインターフェースであり [1], 筋委縮性側索硬化症 (ALS) 患者 [2] のように重度の四肢麻痺を抱える人には福祉用機器として、また健常者に対しても、アミューズメント用として、その応用が期待されている。筆者らはこれまで、

文字入力を目的とした BCI を中心に研究を行ってきた [3] [4] が、移動手段の回復も意思疎通のそれと同等に重要だと思われるため、本研究では、車いす制御を目的とした BCI の開発を行う。

車いす制御などの移動方向を指示する BCI では、操作が直観的であることから、一般に運動想起に基づく方法が用いられる [5]。しかしこの場合、80 % の判別正答率を達成するためには、被験者が 2, 3 週間の訓練を行う必要がある [1]。発症から 3

年から5年の間に死に至ると報告される[2]ように、病気の進行が比較的速いALS患者にとっては、長期訓練を必要とする運動想起に基づくBCIの実用性は低いと考えられる。一方、事象関連電位の一つであるP300に基づくBCIは、訓練を必要としない点において、運動想起に基づくBCIよりも優れていると考えられる。このため筆者らは、車いす制御を目的としたP300に基づくBCI(P300 controller)の開発を行ってきた[6]。

P300に基づくBCIの代表例であるP300 Spellerは、一般に、文字行列をインターフェースとして用いて、ユーザーの意図する文字(ターゲット)を含む行及び列の点灯により誘発されるP300を捉えることで文字入力を可能にする[7]。しかし、この行列型インターフェースのP300の誘発は、文字判別性能がターゲットを注視しているかに依存する。このため、注視点の移動が困難なALS患者に対しては、このようなインターフェースは望ましくないと考えられる。一方、インターフェースの中心に選択候補を順に提示する手法Rapid Serial Visual Presentation(RSVP)を用いたインターフェースが提案されている[8]。このインターフェースは、注視点に依存しないという利点を持つが、行列型インターフェースに比べ、一度に提示できる文字数が少ないため、単位文字入力あたりに必要とする時間が増大するという問題点が挙げられている。一方で、車いす制御を目的としたBCIのように、選択候補が少ない場合には、RSVPインターフェースにおいても刺激呈回数そのものが減少するため、実用的には問題とならない可能性がある。そこでまず本稿では、9個の選択候補が存在するP300 controllerにおいて、RSVPインターフェースと行列型インターフェースの性能の比較を第一の目的とする。

従来、文字判別当たりの刺激呈示数は固定され、各文字につき同数の刺激が呈示されてきた。これに対し、言語モデルなどに基づき刺激数を動的に決定する手法がいくつか提案されており[9]、その有効性が報告されている。筆者らがこれまで報告してきた信頼度に基づく自動再送要求(RB-ARQ)[3]もその一種である。さらに筆者らは、RB-ARQを改良し、ランダム順ではなく、信頼度が最も増加すると期待される順に刺激を呈示する、信頼度に基づく選択的自動再送要求(RB-SR-ARQ)を提案してきた[3]。このRB-SR-ARQをRSVPインターフェースに適用することで、判別速度の低下を抑えられることが期待される。そこで本稿では、P300 controllerにRSVPインターフェースを適用し、さらにその刺激呈示にRB-SR-ARQを適用することで、予想されるRSVPインターフェースの入力速度の低下をどの程度改善できるかの検討を第二の目的とする。

2. 手 法

2.1 インターフェース

本実験で用いたインターフェースを図1に示す。行列型インターフェース(図1(a))の場合は、ターゲットを含む行及び列の点灯時にP300が誘発される。一方、RSVPインターフェース(図1(b))の場合では、ディスプレイの中央に表示されるターゲットの呈示時にP300が誘発される。

それぞれの候補を異なる色にすることでRSVPインター

フェース使用時におけるターゲット認識率が増加するという報告[8]を参考に、本実験においてもそれぞれ候補を異なる色にした。具体的には、色の三属性[10]である彩度、明度、色相のうち、彩度、明度はすべての色において固定し、 $[0, 360]$ で定義される色相は、その定義域を9等分するように各候補に割り当てた。なお、色相は、値を変化させることで、赤、黄色、緑、青、紫と有彩色の色を順に変化させ、循環させる性質を持つ。

2.2 RB-ARQ

BCI開発用の汎用プラットフォームであるBCI2000[11]に搭載されているP300 Spellerでは、予め決められた数の刺激を呈示した後に、それぞれの文字の事後確率 P を計算し、その中で最大となる最大事後確率 λ_N を持つ文字をターゲットと判別する。この場合、刺激呈示途中で最大事後確率が100%に近い値を得た場合でも、予め決められた数まで刺激を呈示するため、判別に時間がかかってしまう。この問題を解決するため、筆者らは、信頼度(最大事後確率)に基づく自動再送要求(RB-ARQ)を提案してきた。

i 番目までの刺激で得られた脳波データ X_i から算出される信頼度を λ_i とする。RB-ARQでは、得られた λ_i が、予め設定しておいた閾値 λ より大きければ、刺激呈示を終了し、小さければ、 $\lambda_i > \lambda$ となるまで刺激の呈示を行う。なお、呈示する刺激はランダム順である。信頼度の計算法などの詳細については[3]を参照されたい。

2.3 RB-SR-ARQ

2.2で述べたように、RB-ARQでは i 番目の刺激呈示後に得られた最大事後確率 λ_i が閾値 λ を超えるまで、ランダム順に刺激を呈示し続ける。それに対して、RB-SR-ARQでは、効率的に信頼度(最大事後確率)を増加させるように呈示する刺激を決定する。

すでに $i-1$ 番目までの刺激が呈示されているとして、 i 番目の刺激 s_i を呈示した後に期待される信頼度 $E[\lambda_i]$ をすべての刺激に対して計算し、 j 番目に大きな信頼度が期待される刺激を $s(j)_i$ で表す。その中で最大となる刺激 $s(1)_i$ を呈示させることで、効率的に信頼度を増加させることが可能となる[4]。ただし、最初の2シーケンスにおいてはRB-ARQと同様に、刺激はランダムに呈示され、刺激を選択的に呈示するのは3シーケンス目以降とする。これは、実験開始時の各候補の事前確率を等しくしているため、1シーケンス目の刺激選定の際に、候補の順位付けをすることができないことと、最大事後確率計算時の外れ値の影響を低減するためである。

しかし、[4]の方法では、ターゲット文字を含む刺激(ターゲット刺激)と、それに隣り合う刺激が交互に呈示される事例が報告されている[4]。また、ターゲット刺激が連続して呈示される可能性も考えられる。一方、ターゲット刺激又はそれに隣り合う刺激の呈示後、500ms以内に再びターゲット刺激が呈示された場合、ターゲット刺激を認識することができず、結果としてP300が誘発されないことが報告されている[12]。刺激呈示間隔を500ms以上にした場合、この問題は発生しないが、逆に入力時間が長くなってしまふ。このため本実験では、刺激呈示間隔を180msとして、最近過去2回に $s(1)_i$ が呈示されていなければ

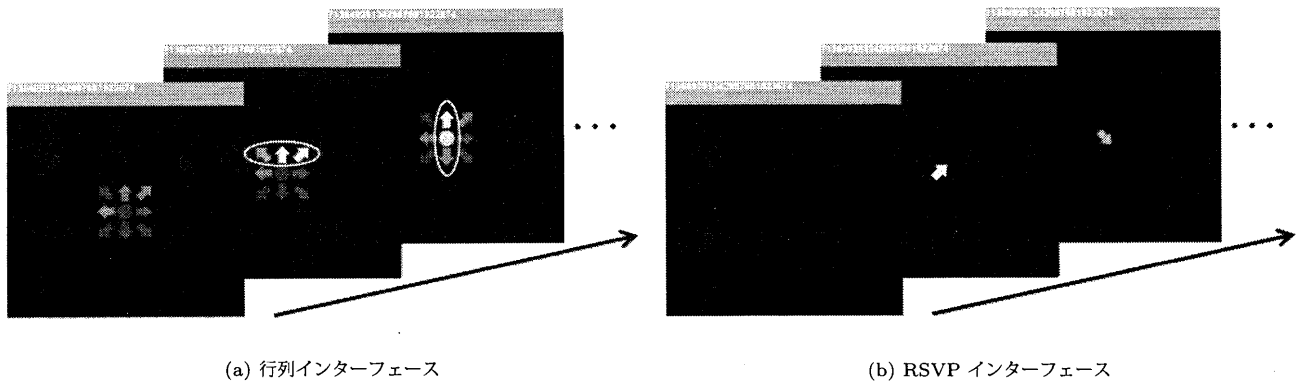


図 1 インターフェース

表 1 各の被験者の実験条件

sub	electrode	window[ms]
1	Fz, Cz, Pz	0-450
2	Fz, O ₁ , Cz, O ₂ , Pz	0-400
3	Fz, Cz, Pz	0-500
4	Fz, O ₁ , Cz, Pz	0-350

ば, $s_i = s(1)_i$. $s(1)_i$ は呈示されているが, $s(2)_i$ が呈示されていないならば, $s_i = s(2)_i$. 上記のいずれの条件も一致しなければ, s_i はランダムな刺激とする. このようにして, ターゲット刺激の連続呈示と刺激の反復呈示を防ぐこととする.

3. 実験

3.1 実験条件

本実験では, BCI2000 [11] に, RB-ARQ, RB-SR-ARQ, RSVP を実装した P300 Speller を用いて実験を行った. 脳波計測には, デジテックス研究所製の Ploymate AP216 を用いた. 電極配置は, 国際 10-20 法に従い, 5 電極 (Fz, Cz, Pz, O₁, O₂), 及び基準電極として A1, A2 に電極を配置し, サンプリング周波数は 100Hz で計測を行った. 1 個の刺激呈示時間は 100ms で, 刺激間隔は 80ms とした. 即ち, 刺激呈示間隔を 180ms とした. 脳波データには, 1Hz のハイパスフィルタを適用した後, 線形判別分析によって判別を行った. 前処理及び判別方法の詳細については [3] を参照されたい.

本実験には 4 人の被験者 (sub1~sub4) が参加した. この 4 人は, 21 歳から 24 歳の健康な男性で, sub1 及び sub2 に関しては, 行列型インターフェースの実験に数回参加した経験があり, sub3 及び sub4 に関しては, 今回初めて脳波実験に参加した被験者である. 入力タスクは, ランダム順に, 「停止」を除く 8 個の方向 (図 1) について 3 セット, 計 24 方向 (1 セッション) を予め用意し, 1 方向ずつ被験者に指示した. まず, 各方向につき 90 回の刺激呈示を行う学習セッションを, それぞれのインターフェースについて行った. 次にテストセッションとして, それぞれのインターフェースに対して RB-ARQ 条件, RB-SR-ARQ 条件の計 4 条件を被験者間でバランスがとれるような順序で行った. なお, 「停止」(図 1(a) 中心の円) の選択肢は, 視覚的及び意味的に他の選択肢と大きく異なり, 判別性能に差が生じると思われたため, 入力課題からは除外した.

RB-ARQ, RB-SR-ARQ における閾値は 90 % とし, 1 個の方

向の選択に対して呈示する最大刺激呈示数を 90 とした. 刺激呈示数が, この最大刺激呈示数に達した場合, たとえ最大事後確率が閾値に達していなかった場合でも, 刺激呈示を終了し, 判別を行った. また, 2 シーケンス (行列型インターフェースにおいては 12 点灯, RSVP インターフェースにおいては 18 回の呈示) を終了する前に, 信頼度が閾値を上回り刺激呈示を終了し, 選択的呈示が開始されない場合, RB-SR-ARQ による速度改善が確認できないため, 5 シーケンスを終えた時点で, 期待される判別正答率が 90 % を超えないように, 変数選択時に判別に使う電極と時間窓の長さを調節した. それぞれの被験者において, 使用した電極と時間窓の長さを表 1 に示す.

3.2 性能評価

本稿では, 性能評価として, BCI の分野で最もよく用いられる性能指標の 1 つである情報伝達速度 (ITR) を用いる [13].

$$ITR = \frac{\log_2(N) + p \log_2(p) + (1-p) \log_2(\frac{1-p}{N-1})}{d} \quad (1)$$

ここで, p はそのセッションにおける判別正答率, N は選択できる候補数 (本実験では, $N = 9$), d は 1 個の方向を判別するのに要した平均時間である.

4. 結果と考察

表 2 に, 本実験で得られた各条件における判別正答率, 単位文字あたりの入力に提示した刺激数, ITR を, 図 2 に ITR をグラフにしたものを示す. なお, 表 2 及び図 2 における RC とは, 行列型インターフェース条件を示す.

今回の実験結果は, 行列型インターフェースの実験に慣れている被験者と慣れていない被験者で, 全体的に大きく異なる結果となった. まず, 判別正答率に関しては, sub1 及び sub2 では行列型インターフェースで高い値を得たが, RSVP 条件では閾値を大きく下回る結果となった. また, sub3 及び sub4 に関しては, RSVP 条件で極めて高い値を得たが, 行列型インターフェースでは, 閾値を下回る結果となった. 一方で刺激数に関して, 反復測定分散分析を行ったところ, インターフェースの違い, 刺激呈示方法の違いで, P 値はそれぞれ 0.18, 0.47 となり, 統計的有意差 (有意水準 5 %) は見られなかった.

次に, 判別正答率と刺激数の両方を考慮した ITR についての検討を行う. 図 2 からわかるように, 判別正答率と同様の傾向があることがわかる. ITR に関しても反復測定分散分析を

表 2 判別正答率, 刺激数, ITR

Interface		判別正答率 [%]		刺激数 [回]		ITR [bps]	
		RC	RSVP	RC	RSVP	RC	RSVP
sub1	RB	83.3	70.8	59.6	56.6	0.114	0.0828
	SR	91.7	66.7	44.8	44.0	0.166	0.0838
sub2	RB	87.5	75.0	36.3	78.6	0.166	0.0760
	SR	100	70.8	19.6	71.3	0.301	0.0718
sub3	RB	87.5	100	64.9	27.1	0.121	0.267
	SR	70.8	100	70.9	27.0	0.0721	0.267
sub4	RB	79.2	95.8	48.1	20.3	0.115	0.262
	SR	83.3	100	38.1	20.0	0.146	0.299

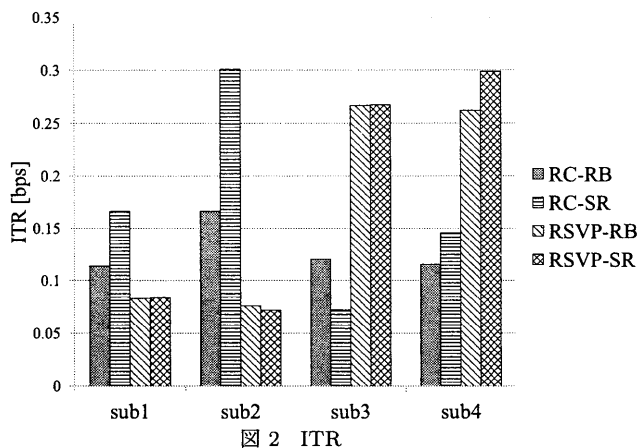


図 2 ITR

行ったところ, インターフェースの違い, 刺激呈示方法の違いで, P 値はそれぞれ 0.032, 0.62 となり, インターフェースの違いによる統計的有意差は見られた。また, インタラクションプロット [14] より, RSVP 条件の方が有効であることを確認した。さらに, このインタラクションについても反復測定分散分析を行ったところ, P 値は 0.49 であった。これらのことから, 9 選択における RSVP は行列型インターフェースよりも優位であることが考えられる。

しかし, 本実験では刺激呈示方法の違いによる統計的有意差は見られない結果となった。この原因としては, まず瞬きなどのアーチファクトの影響が大きかったことが考えられる。さらに, 本実験では選択候補数が少ないため, ランダムに呈示した場合と選択的に刺激を呈示した場合での, ターゲット刺激の呈示回数に大きな差がなかったことも考えられる。

5. まとめ

本稿では, 9 選択における注視点非依存なインターフェース (RSVP) の有用性に対する検証を行った。一般的に 1 選択候補ずつ呈示する RSVP は, 行列型インターフェースに比べ, 入力速度の低下が問題点として挙げられるが, 本実験では, RSVP と行列型インターフェースとの有意な性能差は見られず, 同程度の性能であることが確認された。また, 選択的呈示法 (RB-SR-ARQ) による, 判別速度改善を図ったが, 本実験では有意な差は見られなかった。

今後の課題としては, 被験者によって大きく性能差がみられた RSVP インターフェースの改良とともに, P300 controller に対する RB-SR-ARQ のさらなる性能向上が挙げられる。

謝辞

本研究の一部は, 文部科学省科学研究費 (基盤研究 (C), No. 22500200) の補助を得て遂行された。

文 献

- [1] J. Wolpaw, N. Birbaumer, D. McFarland, G. Pfurtscheller and T. Vaughan: "Brain-computer interfaces for communication and control", *Clinical neurophysiology*, **113**, 6, pp. 767–791 (2002).
- [2] D. Kaub-Wittmer, N. Steinbüchel, M. Wasner, G. Laiers-Groeneveld and G. Borasio: "Quality of life and psychosocial issues in ventilated patients with amyotrophic lateral sclerosis and their caregivers", *Journal of pain and symptom management*, **26**, 4, pp. 890–896 (2003).
- [3] Y. Kaneda, H. Takahashi, T. Yoshikawa and T. Furuhashi: "Performance evaluation of reliability-based selective repeat automatic repeat request applied to p300 speller by online experiment", *TECHNICAL REPORT OF IEICE*, **110**, 461, pp. 35–40 (2011).
- [4] H. Takahashi, T. Yoshikawa and T. Furuhashi: "Selective stimulus presentation based on target-to-target interval for p300 speller", *Proceedings of The 26th Symposium on Biological and Physiological Engineering*, pp. 137–142 (2011).
- [5] J. del R. Millan, F. Galan, D. Vanhooydonck, J. P. E. Lew and M. Nuttin: "Asynchronous non-invasive brain-actuated control of an intelligent wheelchair", *31st Annual International Conference of the IEEE EMBS*, pp. 3361–3364 (2009).
- [6] T. Yokoi, H. Takahashi, T. Yoshikawa and T. Furuhashi: "A study on combination of sensor of detecting obstacles with p300-based brain-computer interface used emotiv in control room", *東海フアジイ研究会*, pp. 1–5 (2011).
- [7] L. Farwell and E. Donchin: "Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials", *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, **70**, 6, pp. 510–523 (1988).
- [8] L. Acqualagna and B. Blankertz: "A gaze independent spelling based on rapid serial visual presentation", *33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS*, pp. 4560–4563 (2011).
- [9] U. Orhan, D. Erdogmus, B. Roark, S. Purwar, K. E. H. II, B. Oken, H. Nezamfar and M. Fried-Oken: "Fusion with language models improves spelling accuracy for erp-based brain computer interface spellers", *33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS*, pp. 5774–5777 (2011).
- [10] H. R. Kang: "Color technology for electronic imaging devices", *Society of Photo Optical* (1997).
- [11] G. Schalk, D. McFarland, T. Hinterberger, N. Birbaumer and J. Wolpaw: "A general-purpose brain-computer interface (bci) system", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **51**, 6, pp. 1034–1043 (2004).
- [12] C. Cinel, R. Poli and L. Citi: "Possible sources of perceptual errors in p300-based speller paradigm", *JBiomedizinische technik*, **49**, pp. 39–40 (2004).
- [13] B. Dal Seno, M. Matteucci and L. Mainardi: "The utility metric: a novel method to assess the overall performance of discrete brain-computer interfaces", *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **18**, 1, pp. 20–28 (2010).
- [14] D. G. Kleinbaum, L. L. Kupper and K. E. Muller: "Applied regression analysis and other multivariable methods", *Duxbury* (1997).