

注視点非依存 P300 speller における文字の部分強調による文字入力性能の向上

高倉 健太郎^{1,a)} 吉川 大弘^{1,b)} 古橋 武^{1,c)}

概要: ALS 患者のコミュニケーション手段として, P300 speller の利用が注目されている. この P300 speller のインターフェースには主に, 行列型と高速逐次視覚刺激呈示 (RSVP) がある. 特に RSVP インターフェースについては, 注視点の移動の必要がないため, より実用的であるといわれている. しかし RSVP インターフェースには, 行列型インターフェースと比較して文字入力性能が悪いという特徴がある. この問題を解決するため, 河合らにより, 部分強調手法が提案されている. しかし, 従来手法では, 部分強調に用いる図形の形, 図形の色の根拠が不明瞭であった. そこで本論文では, RSVP における呈示候補の弁別性能を向上させるため, 部分強調方法について検討を行う. これにより, 部分強調の構造的な特徴について, 図形の形として方形を, 図形の色としてマゼンダを用い, また, 文字の背面に強調図形を配置して部分的な強調を施した部分強調手法を提案する. 文字入力実験を行い, 従来手法と比較して, 文字の正答率と文字入力速度を考慮した指標である文字入力性能 ITR の有意な向上が確認された.

Improvement of Performance on Gaze Independence P300 Speller by Partial Highlight of inputing Character

KENTARO TAKAKURA^{1,a)} YOSHIKAWA TOMOHIRO^{1,b)} FURUHASHI TAKESHI^{1,c)}

1. はじめに

Brain-Computer Interface (BCI) ^{*1} は, 思考を行うときに生じる脳信号を用いて, 外部機器の操作や他者とのコミュニケーションを可能にするシステムである [1]. 四肢を動かすことなく, 思考のみで機械の制御や他者との意思疎通を可能とするため, 重度の ALS (Amyotrophic Lateral Sclerosis: 筋萎縮性側索硬化症) [2][3] のような, 脳からの運動指令は正常であるものの, 何らかの原因により運動機能障害を持つ患者への応用が期待されている. さらに, 介護分野での高齢者の生活補助や, 健常者に対してもアミューズメントゲームのコントローラのような娯楽用として, 実

用化への期待が高まっている. この BCI における性能指標として, 入力の高さや正確さなどが挙げられる [4].

BCI は脳活動計測, 特徴量抽出, 思考判別, デバイス制御から構成されており, 主に計測装置が比較的安価である EEG が BCI 構築に用いられていることが多い. EEG に基づく BCI では, ERP (Event Related Potential: 事象関連電位) の他, 特定の周波数帯域の帯域強度が増える ERS (Event Related Synchronization: 事象関連同期), 周波数帯域の帯域強度が減る ERD (Event Related Desynchronization: 事象関連脱同期) が特徴量として用いられている. BCI ではこれらの特徴量を EEG データから抽出して機械学習を行い, 思考判別を行う. 識別器には LDA (Linear Discriminant Analysis: 線形判別分析) や SVM (Support Vector Machine: サポートベクターマシン), NN (Neural Network: ニューラルネットワーク) がよく用いられている [5].

ALS 患者のための BCI として, Farwell, Donchin[6] が開発した文字入力型の BCI である P300 speller が注目され

¹ 名古屋大学工学研究科計算理工学専攻
Dept of Computational Science and Engineering Graduate
School of Engineering Nagoya University

a) takakura@cmplx.cse.nagoya-u.ac.jp

b) yoshikawa@cse.nagoya-u.ac.jp

c) furuhashi@cse.nagoya-u.ac.jp

*1 Brain-Machine Interface (BMI) に同じ

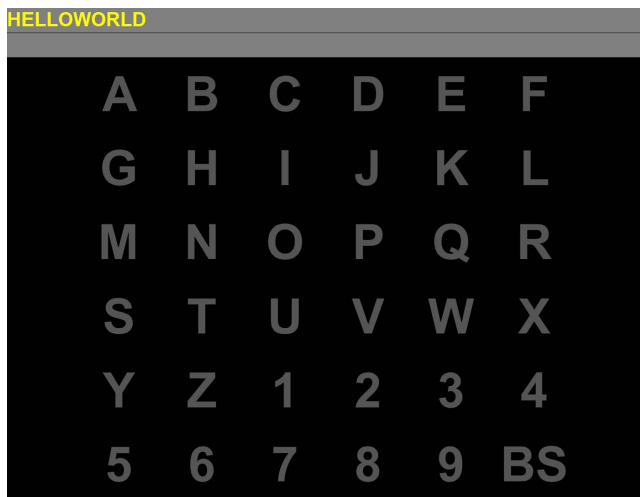


図 1 Farwell, Donchin によって提案された P300 Speller のインタフェース

Fig. 1 P300 speller interface proposed by Farwell, Donchin.

ている。P300 speller では、EEG から得られる ERP の一種である P300 を特徴量として用いる。Farwell, Donchin が開発した P300 speller では、図 1 のような、6 × 6 マスの行列上に英数字と記号が 36 文字配置されたインタフェースを用いて、ランダムに 1 行または 1 列ずつそれぞれ 6 文字同時に 100ms 点灯させることで、視覚刺激を呈示する。このとき、ユーザは選択したい文字 (ターゲット文字) に対して、その文字が点灯した回数を数えることで刺激に意識を集中する。それによりターゲット文字を含む行または列の点灯が低頻度の刺激となり、P300 が誘発される。P300 はターゲット文字が含まれる行もしくは列が点灯したときのみ誘発されるため、P300 を含む脳波を特定することで、ターゲット文字を推定することができる。このように、P300 speller のような P300 に基づく BCI では、ユーザはインタフェースを注視するだけで、外部機器の操作が可能となる。

P300 を利用した実用的なコミュニケーションツールに、長谷川ら [7] によって開発されたニューロコミュニケーターがある。このツールでは、階層的なメッセージ選択法により、最大 512 通りのメッセージの発信が可能である。ニューロコミュニケーターにより、内容選択的なナースコールや介護要望伝達など、医療施設での特化した意思伝達の状況において対応が可能となった。しかし、日常における意思疎通など、ユーザが自由に意思を伝達する状況には十分に対応できるとはいえない。P300 speller により、まぶたを動かすことでかろうじて意思表示ができるような四肢麻痺患者が、介助者がいない時でも自由に自分の思いや考えを発信できるようになれば、患者の QOL は大きく向上すると考えられる。Twitter やブログなどを利用した対話が可能となれば、患者の心はサイバー空間において身体的拘束状態から解放されることが期待される。

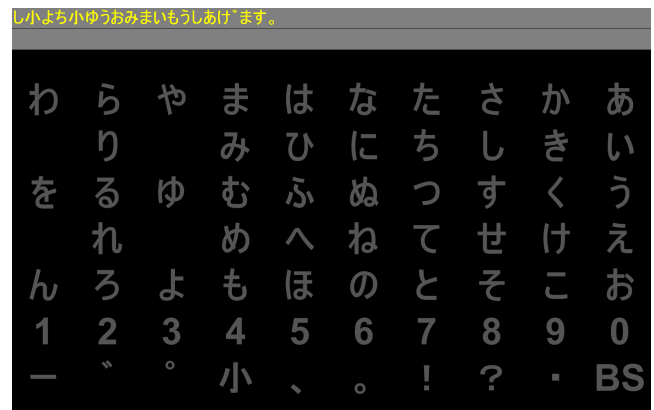


図 2 日本語インタフェース

Fig. 2 Japanese P300 speller interface.

P300 Speller では一般に、図 1 や図 2 のような、行列型インタフェースを用い、インタフェース上の文字をランダムに 1 行、または 1 列ずつ点灯させることでユーザに視覚的な刺激を呈示する。上述の通り、ユーザが意識を集中させることで P300 が誘発された行と列をシステムで捉えることで、ユーザの選択したい文字を特定し、文字入力が可能となる。しかしこの行列型インタフェースでは視覚刺激を用いており、文字判別性能がユーザのターゲット注視度合いに依存する [8]。このため行列型インタフェースでは、注視点の移動さえ困難であると考えられる重度の ALS 患者に対しては、ユーザの負担を増加させることになり、文字判別性能が低下するという問題が指摘されている [8][9]。

この問題に対し、図 3 のように、画面の中心に選択候補を一文字ずつランダム順に呈示する RSVP (Rapid Serial Visual Presentation: 高速逐次視覚刺激呈示) インタフェースが提案されている [10]。このインタフェースは、注視点に依存せずに文字入力が行えるという利点を持つ。しかしユーザにとっては、行列型インタフェースでは注視している文字の点灯に注目するだけでよいのに対して、RSVP では、どの文字が呈示されたかを瞬時に判別し、入力文字であるかどうかを判断しなければならない。その結果、RSVP による P300 Speller では、文字入力性能が低下してしまうことがある [11]。この文字入力性能の低下の抑制を目的として、これまでに、それぞれの候補を異なる色にしてユーザに呈示することで、呈示候補の認識率を増加させる方法が提案されている [10][12]。しかし、こうした文字候補を互いに異なる色にすることは、ターゲットの認識率を向上させる一方で、色相関で隣り合う色の候補や赤系統の色の候補に間違える頻度が高くなる [12] ことが課題として挙げられる。

さらに、複数の色を用いることによる文字入力性能の低下を解消した手法として、河合及び筆者らにより、部分強調法が提案されている [13]。部分強調法では、呈示候補に対し、図 4 のように呈示文字の構造的特徴を黄色の円で強

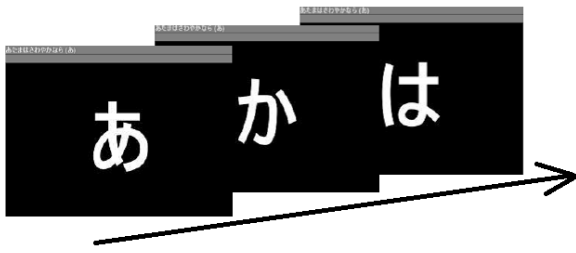


図 3 RSVP インタフェース
Fig. 3 RSVP interface.



図 4 河合らによる部分強調の例
Fig. 4 Partial highlight proposed by Kawai.

調する手法であり、強調を施さない文字候補に対して、文字入力正答率と入力速度の両方を考慮した指標である ITR (Information Transfer Rate: 情報伝達速度) の有意な向上が確認されている。しかし、[13] で提案された部分強調法では、強調の形、色、位置に関して明確な根拠が示されているわけではない。

そこで本論文では、RSVP における部分強調法において、強調の形、色、位置の検討を行い、強調の形として方形を、強調の色としてマゼンダを、強調の位置として呈示候補の背面からの強調を用いる部分強調法を提案する。実験を行い、従来の部分強調法と比較して、本手法により ITR が向上することを示す。

2. 関連研究

Laura ら [14] は、RSVP インタフェースを用いたアルファベット 26 文字と、',', '!', ' _' の 3 種類の記号とバックスペースを含む計 30 候補の選択において、呈示候補を 5 色のグループ (赤, 白, 青, 緑, 黒) に色分けすることで、候補文字の認識率を向上させる方法を提案した。刺激呈示間隔 116ms において、呈示候補を全て黒色にした色分け無し群と色分け群とで文字入力を行い、色分け群で 1 分間あたりの文字入力数が向上したことを報告している。

Treder ら [15] は、図 5 のように、呈示候補を 6 グループに分け、異なる色と形を持つ図形と共にグループ分けした候補を呈示する方法を提案した。Laura らと同様の 30 候補の選択において、13 名で文字入力実験を行い、刺激呈示間隔 200ms において、平均 97.1±1.5 % の正答率が得られたことを報告している。

しかし、先に述べた通り、こうした文字候補を互いに異

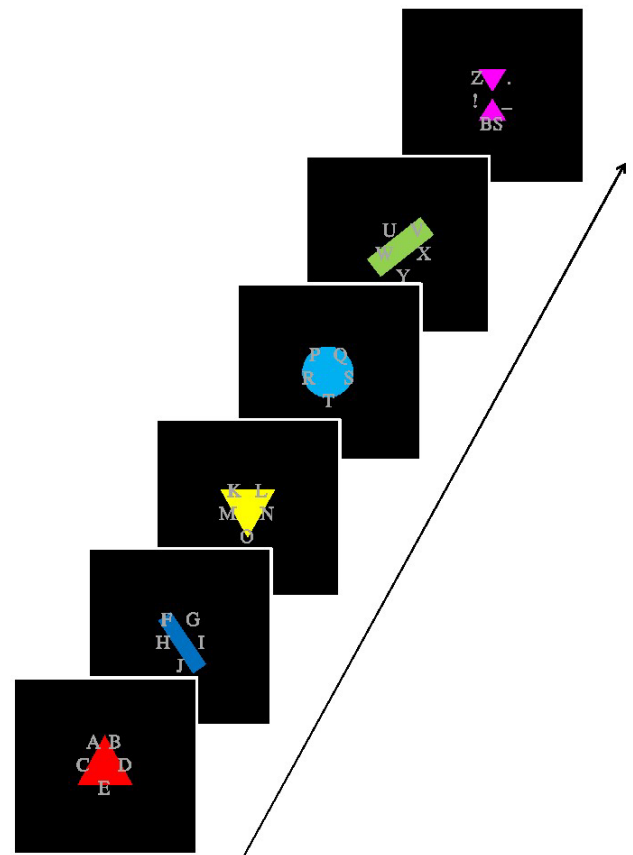


図 5 Treder らによる呈示方法のイメージ
Fig. 5 RSVP interface proposed by Treder

なる色にすることは、色相関で隣り合う、すなわち近い色の候補や、生物的に反応しやすいといわれている赤系統の色の候補に間違える頻度が高くなるという課題がある。

これに対し河合ら [13] は、部分強調法による呈示候補の瞬時認識率向上を試みている。[13] では、図 4 に示す通り、白字の文字候補について、ひらがなの部分構造 (囲み・ねじれ・丸み・分離) を選び出し、黄円で囲むことで文字を強調している。強調される部分構造は、候補間でできるだけ円の位置が重ならないように、また、円の部分だけをみれば、候補の中のどの選択候補かがわかるように手作業で選択されている。[13] では、オフライン実験により、強調を施さない文字候補に対して、ITR の有意な向上が確認されたことを報告している。

3. 提案手法

部分強調は、強調に用いる形、色、及び強調の重ね方といった要素から成り立っていると考えられる。従来の部分強調法では、強調の形として円形を、強調の色として黄色を使用しており、強調は文字の手前に重ねている。これらの要素に対して検証を行い、最も適切と考えられる部分強調パターンの検討を行う。

強調の形に関して、玉岡ら [16] は、直線的な形態は感覚弁別しやすく、曲線的な形態は感覚識別しやすいと報告し

表 1 明度と色差
Table 1 lightness and colour component

	R	G	B	明度	白との色差	黒との色差
白	255	255	255	255	0	765
黒	0	0	0	0	765	0
マゼンダ	255	0	255	105.315	255	510
水色	0	255	255	178.755	255	510
黄色	255	255	0	225.93	255	510

ている。なお、感覚弁別とは、複数の文字を並べて比較した際、どれが対象の文字であるかを適切に見分けることであり、感覚識別とは、ある特定の文字を他と比較することなくその文字であると識別することである。入力したい文字だけでなく、RSVPにより連続呈示される複数の平仮名の中から、ある特定の平仮名を識別するには、感覚弁別しやすい文字構造であることが求められる。そのため、直線的な構造を用いて平仮名の感覚弁別機能を向上させることが適切と考えられる。そこで本論文では、候補の構造的特徴を四角形を用いて強調する。

次に、適切な強調の色を検討するために、以下の2式で定義される、明度 Y および色差 D_{ij} を使用する。

$$Y = \frac{299R + 587G + 114B}{1000} \quad (1)$$

$$D_{ij} = |R_i - R_j| + |G_i - G_j| + |B_i - B_j| \quad (2)$$

明度は色の明るさを、色差は色空間上のマンハッタン距離を表し、ディスプレイの色を表現する一般的な色空間の一つである RGB の各値から算出される。黒色背景における白字の候補を強調するため、黒・白との明度差が大きく、かつ黒との色差は大きく、白との色差が小さくなるような色を選択することが望ましいと考えられる。R, G, B の値が 0 あるいは 255 である色のうち、黒との色差が大きく、白との色差が小さいマゼンダ、水色、黄色に関して、R, G, B の値と明度、白との色差、黒との色差を比較したものを表 1 に示す。表 1 より、明度に着目すると、白及び黒と明度の値が最も遠いものはマゼンダであるため、本論文では、強調の色をマゼンダとする。

強調の重ね方に関して、文字の前面に強調を置くものと文字の背面から強調するものの二通りが考えられる。そこで本論文では、強調を文字の前面におく場合と背面に置く場合の二種類の強調法について、その文字入力性能を実験で比較することにより、どちらが部分強調として適当であるかの検討を行う。

以上の三要素の検討より、2種類の部分強調法を比較する。以降、候補の前面に強調を置いたものを提案(前)、候補の背面から強調したものを提案(背)と定義する。「あかさたなはまやらわ」の 10 候補に対して、提案(前)によって強調した例を図 6 に、提案(背)によって強調した例を図 7 に示す。なお、強調の位置に関しては、従来手法に従い、候補間でできるだけ強調の位置が重ならないように、



図 6 提案(前)における強調の例

Fig. 6 An example of proposed method highlighted on surface.

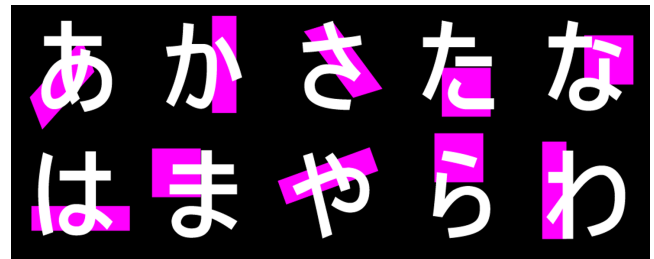


図 7 提案(背)における強調の例

Fig. 7 An example of proposed method highlighted from back.

また、強調の部分だけをみれば、候補の中のどの選択候補かがわかるように手作業で選定した。

4. 実験

提案手法における、強調の重ね方による文字入力性能の比較と、従来の部分強調手法*2との文字入力性能比較を行うための実験を行った。

4.1 使用データ

実験には、RSVP インタフェースを使用して文字入力を行う実験によって得られた二十代の男性 7 名 (sub1~sub7) の脳波データを使用した。被験者は全て 20~24 歳の男子大学生である。脳波計測の際には、BCI 開発用の汎用プラットフォームである BCI2000 [17] に搭載されている P300 speller を用いた。脳波計には、デジテックス研究所製の PolymateAP216 を用いた。電極配置は、図 8 に示す国際 10-20 法 [18] に従い、5 電極 (Fz, O₁, Cz, O₂, Pz)、及び基準電極として A1, A2 (耳朶) 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 回の刺激呈示間隔を 200ms とし、点灯時間を 100ms、消灯時間を 100ms とした。P300 speller のインタフェースには、図 3 に示すような RSVP インタフェースを用い、被験者とディスプレイの距離は約 70cm で、画面上に縦横およそ 3cm の選択候補を呈示した。呈示した候補は、図 4 に示す従来手法および図 6 に示す提案(前)、図 7 に示す提案(背)によって部分強調された、「あかさたなはまやらわ」の 10 候補である。各文字は、ランダムな順で呈示し、1 文字の入力毎に 100

*2 本章では単に“従来手法”と呼ぶ

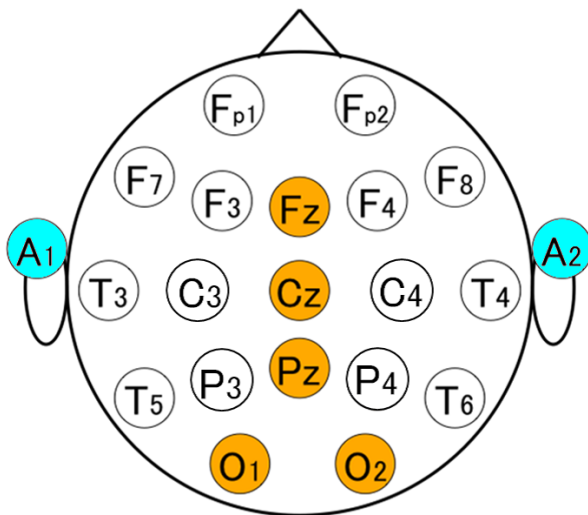


図 8 使用電極
Fig. 8 Electrodes.

回の点灯を行った。従来手法及び 2 種類の提案手法によって強調された各候補群を用いて、学習用データ 10 文字とテスト入力用データ 20 文字の計 30 文字分のデータを、それぞれ計測した。また、3 種類の強調法の呈示順は、被験者ごとに異なるよう、ランダムな順で呈示した。

4.2 実験方法

初めに計測した 10 文字分の脳波データを使用し、判別器の学習を行った。データの学習にはステップワイス線形判別分析 (SWLDA: StepWise Linear Discriminant Analysis) [19] を用いた。次に、後半の 20 文字分の脳波データに対して、文字判別を行った。このとき、刺激呈示法として、判別時間短縮を目的として高橋らによって提案された、信頼度に基づく自動再送要求 (RB-ARQ: Reliability-Based Automatic Repeat reQuest) [20] を用いた。RB-ARQ は、脳波データの統計処理により事後確率に基づいて刺激呈示を途中で打ち切る手法であり、 i 番目までの刺激で得られた脳波データ X_i から導出される信頼度を λ_i としたとき、得られた λ_i が、予め設定された閾値 λ より大きければ、刺激呈示を終了し、小さければ引き続き刺激呈示を行う手法である。なお、信頼度の計算法の詳細については、[20] を参照されたい。本実験では、RB-ARQ の閾値 λ を 0.98 とした。評価指標として、正しく入力した文字数を入力した文字数で割った正答率、及び 1 文字あたりの判別に要した点灯数 (判別時間)、正答率と判別時間の両方を考慮した指標である、ITR を算出した。ITR は次式で定義される。

$$\text{ITR}(\text{bit}/\text{min}) = \frac{\log_2(N) + p \log_2(p) + (1-p) \log_2\left(\frac{1-p}{N-1}\right)}{d} \quad (3)$$

ここで、 p が正答率、 N は選択候補数、 d は一文字を入力するのに要した時間 (分) を表している。

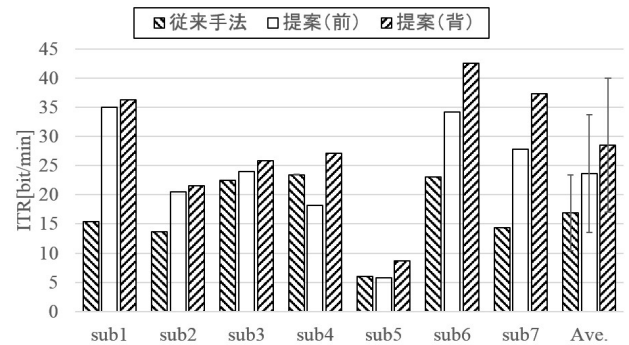


図 9 部分強調法における ITR
Fig. 9 ITR for seven subjects

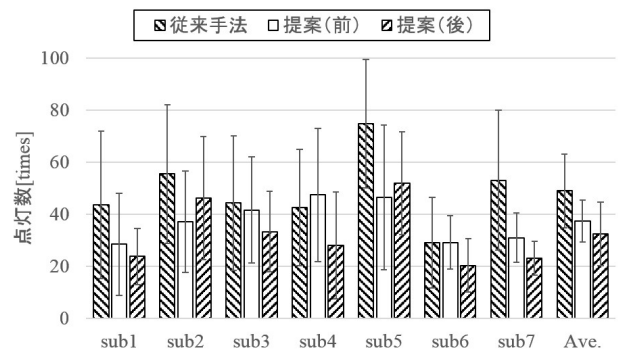


図 10 部分強調法における 1 文字あたりの平均点灯数
Fig. 10 Averaged number of stimuli for seven subjects

4.3 結果と考察

図 9 に、得られた 7 名の被験者の ITR 及びその平均を示す。図 9 より、全ての被験者で、提案 (背) の ITR が、提案 (前) 及び従来手法を上回っていることが確認できる。多重性を考慮し、シダックの方法で有意水準を調整した対応のある t 検定を行ったところ、提案 (背) と提案 (前) の間 ($p = 0.0167$)、及び提案 (背) と従来手法の間 ($p = 0.0106$) に有意差が見られた。これにより、ITR において、前面に強調を置く場合と比較して、背面から強調する方がより部分強調に適していること、また、強調の形、色、重ね方を考慮することにより、従来手法と比較して ITR が向上することが示された。

次に、図 10 及び図 11 に、1 文字の判別に要した平均点灯数と正答率を示す。図 10 および図 11 より、従来手法と比較すると、提案 (背) は、全ての被験者で点灯数が削減されている一方、正答率にはそれほど差はみられなかった。このことより、点灯数の削減により ITR が向上したことがわかる。点灯数の削減は、文字の瞬時認識率が向上したことにより、被験者が意識している文字に対して、P300 が誘発されやすくなったためだと考えられる。また、提案 (背) に対して、提案 (前) の ITR は低かった。この理由として挙げられるのは、前面に強調を置くことで、平仮名の部分構造を見にくくしてしまったためだと考えられる。

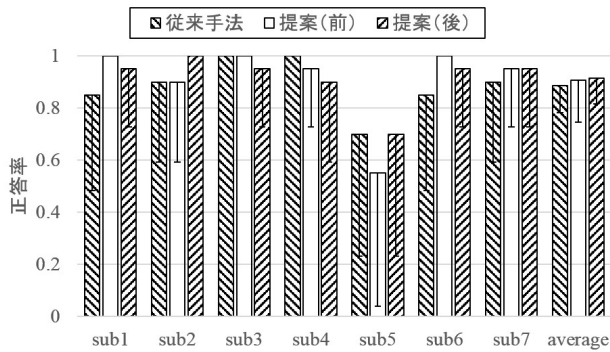


図 11 部分強調法における文字入力正答率
 Fig. 11 Accuracy for seven subjects

5. おわりに

本論文では、注視点非依存なインタフェース (RSVP) における文字候補の部分強調法の改良を行い、その有効性に対する検証を行った。実験の結果、部分強調の形として方形を、色としてマゼンダを使用し、呈示候補の背面から強調を施すことによって、ITR を全被験者において向上させ、平均で 11.6bit/sec の向上を確認した。今後の課題としては、50 音全ての文字に対する文字入力性能の確認、強調位置の自動決定、ALS 患者での性能検証が挙げられる。

謝辞 本研究は、独立行政法人科学技術振興機構 (JST) の研究成果展開事業「センター・オブ・イノベーション (COI) プログラム」の支援によって遂行された。

参考文献

- Wolpaw, J., Birbaumer, N., McFarland, D., Pfurtscheller, G. and Vaughan, T.: Brain-computer interfaces for communication and control, *Clinical neurophysiology*, Vol. 113, No. 6, pp. 767–791 (2002).
- Rowland, L. and Shneider, N.: Amyotrophic lateral sclerosis, *New England Journal of Medicine*, Vol. 344, No. 22, pp. 1688–1700 (2001).
- Kaub-Wittemer, D., Steinbüchel, N., Wasner, M., Laier-Groeneveld, G. and Borasio, G.: Quality of life and psychosocial issues in ventilated patients with amyotrophic lateral sclerosis and their caregivers, *Journal of pain and symptom management*, Vol. 26, No. 4, pp. 890–896 (2003).
- Krusienski, D., Sellers, E., McFarland, D., Vaughan, T. and Wolpaw, J.: Toward enhanced P300 speller performance, *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 167, No. 1, pp. 15–21 (2008).
- Zhou, S., Gan, J. Q. and Sepulveda, F.: Classifying mental tasks based on features of higher-order statistics from EEG signals in brain-computer interface, *Information Sciences*, Vol. 178, No. 6, pp. 1629–1640 (2008).
- Farwell, L. and Donchin, E.: Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials, *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, Vol. 70, No. 6, pp. 510–523 (1988).
- 長谷川良平：ニューロコミュニケーター：脳波による意思伝達装置の開発 (視聴覚技術, ヒューマ, 映像情報メディア学会技術報告.
- Brunner, P., Joshi, S., Briskin, S., Wolpaw, J., Bischof, H. and Schalk, G.: Does the P300 speller depend on eye gaze?, *Journal of neural engineering*, Vol. 7, No. 5, p. 056013 (2010).
- Treder, M. S. and Blankertz, B.: (C) overt attention and visual speller design in an ERP-based brain-computer interface, *Behavioral and brain functions*, Vol. 6, No. 1, p. 28 (2010).
- Acqualagna, L. and Blankertz, B.: A gaze independent spelling based on rapid serial visual presentation, *33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS*, pp. 4560–4563 (2011).
- Chennu, S., Alsufyani, A., Filetti, M., Owen, A. M. and Bowman, H.: The cost of space independence in P300-BCI spellers, *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, Vol. 10, No. 1, p. 82 (2013).
- Treder, M. S., Schmidt, N. M. and Blankertz, B.: Gaze-independent brain-computer interfaces based on covert attention and feature attention, *Journal of neural engineering*, Vol. 8, No. 6, p. 066003 (2011).
- 河合康平, 古川大弘, 古橋武：高速逐次視覚呈示における候補の強調による文字判別性能向上に関する検討, 電子情報通信学会技術研究報告. NC, ニューロコンピューティング, Vol. 113, No. 500, pp. 199–202 (2014).
- Acqualagna, L. and Blankertz, B.: A gaze independent spelling based on rapid serial visual presentation, *2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, IEEE, pp. 4560–4563 (2011).
- Treder, M. S., Schmidt, N. M. and Blankertz, B.: Gaze-independent brain-computer interfaces based on covert attention and feature attention, *Journal of neural engineering*, Vol. 8, No. 6, p. 066003 (2011).
- 玉岡賀津雄：平仮名と片仮名の処理における感覚弁別および成覚識別機能, *The Science of Reading* (1997).
- Schalk, G., McFarland, D., Hinterberger, T., Birbaumer, N. and Wolpaw, J.: A general-purpose brain-computer interface (bci) system, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 51, No. 6, pp. 1034–1043 (2004).
- Jasper, H.: The ten-twenty electrode system of the international federation, *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, Vol. 10, No. 2, pp. 371–375 (1958).
- Krusienski, D., Sellers, E., Cabestaing, F., Bayouth, S., McFarland, D., Vaughan, T. and Wolpaw, J.: A comparison of classification techniques for the P300 Speller, *Journal of neural engineering*, Vol. 3, No. 4, pp. 299–305 (2006).
- Takahashi, H., Yoshikawa, T. and Furuhashi, T.: Error Control for Performance Improvement of Brain-Computer Interface: Reliability-Based Automatic Repeat Request, *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, Vol. 94, No. 6, pp. 1243–1252 (2011).