

原著論文

手掌への振動刺激による脳内血行動態と心拍変動への影響

杉本 潤哉¹⁾, 萩原 啓²⁾¹⁾ 立命館大学大学院 情報理工学研究科, ²⁾ 立命館大学 情報理工学部

Effect on Brain Hemodynamics and Heart Rate Variability by Vibratory Stimulus to Palm

Junya SUGIMOTO¹⁾, Hiroshi HAGIWARA²⁾¹⁾ Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University²⁾ Collage of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

Abstract: Traffic accidents often caused by human error. It is said that major contributing factors are fatigue from continuing monotonous task. In our study, we investigated the hemodynamics in the frontal and somatosensory association areas under vibratory stimulation. We prepared two types of tasks which were a monotonous task and the Stroop test. We compared the hemodynamics under vibratory stimulation (200Hz) with the hemodynamics under no vibratory stimulation during these two tasks. We unraveled feature extraction of brain hemodynamics under the vibratory stimulation. We examined the utility of the vibratory stimulation during the monotonous and Stroop test. The performance of monotonous task was improved by vibratory stimulation. On the other hand, the performance of the Stroop test was not affected by vibratory stimulation. In contrast, physiological indexes were influenced by vibratory stimulation for both the monotonous task and Stroop test. The HF (high frequency component) for the monotonous task and Stroop test were statistical different between the vibratory and no stimulation. In addition, monotonous of δ -oxyHb in somatosensory area also showed a statistical difference between vibratory stimulation and no stimulation. This result suggests that presenting vibratory stimulation improves monotonous tasks. Therefore, to use vibratory stimulation during driving may decrease traffic accidents which are caused by human errors.

Keywords: fNIRS, δ -oxyHb, vibratory stimulus, somatosensory area, monotonous task

キーワード: fNIRS, δ -oxyHb, 振動刺激, 体性感覚野, 単調作業

1. はじめに

近年先進国では 24 時間化社会が進み、深夜労働、長時間労働からくる疲労、ストレス、眠気により事故がたびたび起きている。そのため、事故防止のための技術開発が必要とされており、様々な技術が開発されている。最近では車にセンサが取り付けられ、車間距離を保ち追突を防止するシステムや、アクセルの踏み間違いを検知し衝突を防止するといったシステムが開発されている。漫然運転などのドライバのヒューマンエラーを防止するための技術としては画像処理を用いた居眠りを検知するシステムが開発されている[1]。眠気を伴っているドライバの注意喚起として居眠りを検知した後どのような外部刺激を呈示するのが今後重要な課題となってくる。また、ヒューマンエラーの研究では精神作業負荷(メンタルワークロード)と関連した研究[2]が多くされており、外部刺激とヒューマンエラーに関する

研究も必要性が増している。そのため、ヒューマンエラーを減らすために、どのような外部刺激が有用であるかを調べることは居眠り運転などのヒューマンエラーに繋がる漫然運転の事故防止のために非常に有益であると考えられる。本研究では文化的背景に依存し難い振動刺激を用いた。それに加え、振動刺激ならば運転中のドライバにも呈示可能であり、スマートフォン等のモバイル機器には振動素子が搭載されていることが多くスマートフォンのアプリとしての開発も可能ということで、汎用性の高い振動刺激を呈示刺激とした。本実験では操作性を問う単調なタスクと認知、判断を問うタスク2種類のタスクを用意し、振動刺激がパフォーマンスの向上に有用であるか、生理指標にどのような影響を与えるかを調べた。生理指標を解析することにより、振動刺激がどのような影響を与えるかを、定量的かつ客観的に評価するために用いた。

2. 実験方法

2.1 概要

本実験では運転中に必要とされる追従型のパフォーマンステストと、認知・判断能力を必要とするパフォーマンステストをそ

2013年10月31日受理.

それぞれ用意した。パフォーマンステスト中の生理データとして ECG(心電図), 脳内血中酸素化ヘモグロビン濃度変化を計測した。それぞれのパフォーマンス中に振動刺激を呈示した場合と, 振動刺激無しの場合にパフォーマンステストの結果や生理データにどのような差異が生じるのかを統計処理を施し調べた。

2.2 パフォーマンステスト

2.2.1 標的追従課題

追従型のパフォーマンステストとして標的追従課題を行った。8 の字に動くターゲットをマウスで追従するタスクを行った。このときマウスを操作する手を被験者の利き手とした。この標的追従課題は LabVIEW(日本ナショナルインスツルメンツ)にて作成した。サンプリングレートは 12Hz として計測を行った。

2.2.2 ストループテスト

ストループテストとは, 文字の意味と文字の色が一致しているか判断するテストである。図 1 の左のように, 文字の意味と文字の色が一致しているのを正解, 図 1 の右のように, 文字の意味と文字の色が一致していないものを不正解とした。被験者はストループテストを足のスイッチを用い回答し, 正解の時は右の足スイッチ, 不正解のときは左の足スイッチを押した。自動車運転中には右足でアクセルとブレーキを踏むことから, 足スイッチを踏む際に使う足を右足だけに統一した。ストループテストは 2 秒に 1 問の割合で呈示され, 文字がディスプレイに表示されたから被験者が 1000msec 以内に回答しないと不正解として扱い, 被験者にはできるだけ早く回答するよう実験前に伝えた。

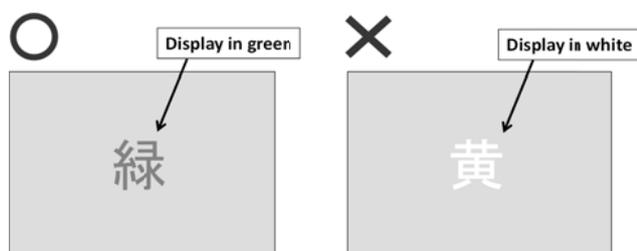


図 1 ストループテスト

Fig.1 Stroop test

2.3 被験者

被験者は健康な成人 21~22 歳の 10 名(男性 9 名, 女性 1 名, 利き手 右利き 10 名)で, 十分なインフォームドコンセントを得て実験を行った。

なお, 本研究は立命館大学における人を対象とする研究倫理審査委員会の承認を得て実施した。

2.4 実験プロトコル

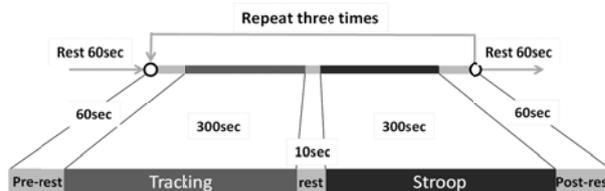


図 2 実験プロトコル

Fig.2 Experimental protocol

図 2 に実験プロトコルを示す。始めに 60 秒間の安静座状態を計測する。その後, 前レスト 60 秒, 標的追従課題 300 秒, タスク切り替えのための中レスト 10 秒, ストループテスト 300 秒, 後レスト 60 秒の一連の流れを 3 回繰り返す。その後安静状態で 60 秒計測を行った。振動ありと振動なしの状態それぞれ, パフォーマンステスト, 生理指標を計測した。振動呈示時に音が発生するため, 振動の有無での条件を同じにする様に被験者は実験中にホワイトノイズを聞いた。順序効果を考慮して, 振動ありと振動なしの呈示する順序をランダムとした。振動ありと振動なしの結果を比べることによって, 振動刺激による影響を調べた。

姿勢制御のために被験者は顎乗せ台に顎を乗せ椅子の上に座り, 頭部の動きによるノイズの影響を抑えた。またプローブから出るファイバークーブルも束ねることによって, プローブが動くことによって生じるノイズを軽減させた。

2.5 生理指標

2.5.1 心電図

心電図の計測には多用途生体計測器 Polymate(デジテック研究所)を用い, 4 点誘導法に則って被験者の左右鎖骨の下 2 箇所と左右の肋骨下から 2 本目にあたる箇所にて電極を装着した。電極装着前にはノイズの原因となる, 皮膚の汚れや皮脂をとるため, 電極装着位置を皮膚前処理剤で擦り, アルコールコットンで拭いて, インピーダンスをできるだけ下げてから電極を装着した。

2.5.2 脳内酸素化ヘモグロビン濃度

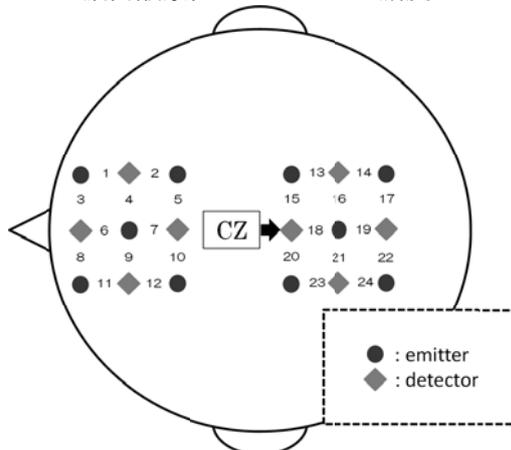


図 3 NIRS 計測位置

Fig.3 Measurement point of NIRS

脳内血中ヘモグロビン濃度変化計測には近赤外光イメージング装置 OMM-3000(島津製作所)を使用した。図3はNIRSのプロブ装着位置であり、図のように受光プロブと送光プロブを装着し、チャンネルを設定した。発光プロブと送光プロブの間隔は3cmである。国際10-20法に則り、CZが18chの前方3cmに位置する様に前頭用計測ホルダを装着した。前頭前野と体性感覚野に当たる計24チャンネルを計測した[3-5]。

2.6 振動刺激

人間の振動刺激の受容器としてマイスナー小体とパチニ小体2種類の受容器がある。マイスナー小体は低周波の振動刺激の受容器であり、最低閾値が30Hz付近にあると言われている。一方、パチニ小体は高周波の振動刺激の受容器であり、最低閾値が200Hz付近にあると言われている[6]。マイスナー小体とパチニ小体の最低閾値を比べるとパチニ小体の方が低い。このことより、人間は200Hz付近の振動刺激の感覚が最もいいことがわかる。このことを考慮して、振動刺激は200Hzの正弦波波形とした。

人間の振動刺激の受容器はある一定時間刺激を呈示し続けると順応すると言われている。そのため、本研究では順応を考慮し、刺激間隔を4秒、振動呈示時間を3秒とした[7]。また、振動を呈示する位置を手掌とした。ペンフィールドの脳地図により、手掌が占める割合が大きいため、効率的に振動刺激を受容できると考えた。振動波形は0105任意波形作成ソフトウェアVer.5.00(エヌエフ回路設計ブロック)で作成し、シンセサイザーFUNCTION SYNTHESIZER1915(エヌエフ回路設計ブロック)でPCとPower Amplifier Type 2718(ブリュエル・ケア)の増幅器を繋ぎ、Small Vibration Exciter Type 4810(ブリュエル・ケア)の振動発生器を用いて振動を発生させた。

3. 解析方法

3.1 標的追従誤差

操作性を問うタスクとして標的追従型のパフォーマンステストを用いた。このタスクでは標的の座標(X,Y)と、マウスの座標(x,y)がサンプリングレート12Hzで得られる。下記の(1)式を用いて得られた座標データより、標的追従誤差E(t)をそれぞれ算出した。標的追従誤差の平均値、ならびに一試行中の標的追従誤差をばらつき度合として標準偏差の平均を求め解析に用いた。

$$E(t) = \sqrt{(X - x)^2 + (Y - y)^2} \quad (1)$$

3.2 ストループ

ストループテストでは、ディスプレイに文字が表示されてから、被験者が反応し、スイッチを押すまでにかかった反応時間、反応時間の標準偏差、正答率を計測した。

3.3 心拍変動 HF,LF/HF

本研究では心電図の棘波であるP,Q,R,S,T波のうちR波と

R波の間隔から心拍周期の変動を得た。この得られた心拍変動に周波数解析を行い、0.15Hz-0.4Hzの周波数成分を累積したものをHF、0.05-0.15Hzの周波数成分を累積したものをLFとして算出した。HFは副交感神経系の活動度合の指標であり、LFは交感神経および副交感神経系の活動度の指標である。そのためLF/HFは交感神経系の活動度の指標である。

3.4 NIRS

NIRSの計測では酸素化ヘモグロビン濃度変化、脱酸素化ヘモグロビン濃度変化、総ヘモグロビン濃度変化の3つの値を得られるが、本研究では局所脳血流変化と最も相関が強いとされる酸素化ヘモグロビン濃度変化を解析対象とした[8]。タスクは標的追従課題、ストループテスト共に300秒を3回繰り返しているが、タスク開始からの10秒間を解析対象外として290秒間を解析対象とした。神経血管カップリング反応[9]により、神経活動の後に血流の増加が報告されており、時間的ずれが生じる[10-11]。そのため、本実験ではタスク開始からの10秒間を解析対象外とした。

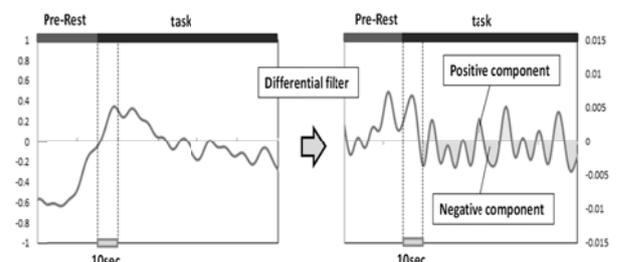


図4 δ -oxyHb

Fig.4 δ -oxyHb

今回の解析ではノイズを除去するためにバンドパスフィルタを用いた。心拍や呼吸といった生体が起源となるノイズを除去する目的で、0.1Hzのローパスフィルタを適用した。1回のプロトコルが38分30秒になるため、ドリフト現象による影響が大きいと考えられる。そのため、ベースラインからのドリフト的なアーティファクトを除去する目的で0.001Hzのハイパスフィルタを適用した。バンドパスフィルタ適用後、それぞれの被験者のチャンネル毎の振動ありと振動なしのNIRSの時系列データを合わせて正規化した。また、この正規化したグラフが増加傾向にあるか、減少傾向にあるか否かを定量的に判断するために δ -oxyHbを定義した[12]。NIRSで計測されるデータは相対値である。そのためNIRSのデータの増減のトレンドが重要であると考えた。図4の左のグラフはバンドパスフィルタを適用し、それぞれの被験者のチャンネル毎の振動ありと振動なしのNIRSの時系列データを合わせて正規化した後のグラフである。このグラフに微分フィルターを適用し、図4の右のグラフを得る。図4の右のグラフは元のデータの瞬間の傾きの時系列変化を表している。得られたグラフの0より大きい成分の面積の総和を増加成分、0より小さい成分の面積の総和を減少成分とし、増加成分から減少成分を引いたものを δ -oxyHbと定義した。 δ -oxyHbが正の値

であればそのグラフは上昇傾向にあり, δ -oxyHb が負の値であればそのグラフは下降傾向である。

4. 結果

4.1 標的追従誤差

図5は標的追従誤差の被験者10人の振動あり(200Hz)と振動なしのときの平均のグラフであり,図6はばらつき度合である標準偏差の平均の被験者10人の振動ありと振動なしのときの結果のグラフである。標的追従誤差の振動ありのときは 15.13 ± 10.74 pixels であったのに対して,振動なしのときは 18.76 ± 22.48 pixels であった。標的追従誤差の平均は振動ありのときと振動なしのときで $p=0.076 < 0.1$ の統計的有意傾向が得られた。ばらつき度合は振動ありのときで 10.74 ± 4.89 pixels であり,振動なしのときで 26.25 ± 22.48 pixels であった。ばらつき度合は振動ありと振動なしのときで $p=0.051 < 0.1$ の統計的有意傾向が得られた。

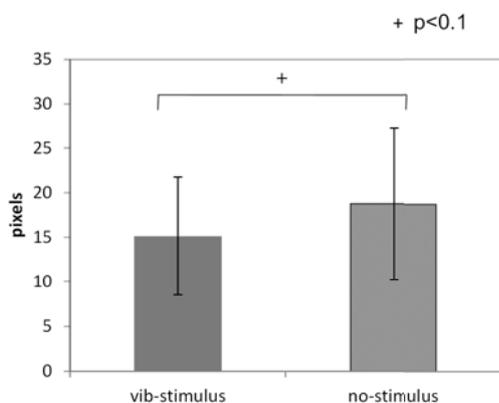


図5 標的追従誤差
Fig.5 Tracking error

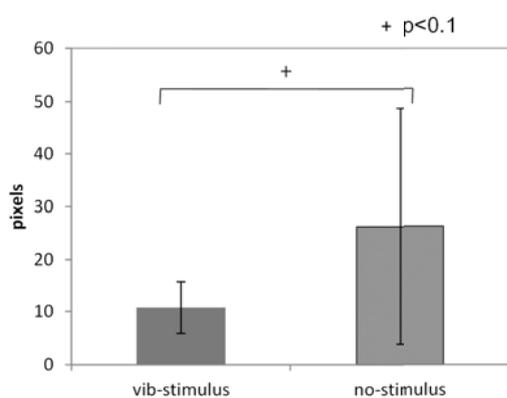


図6 ばらつき度合
Fig.6 Variance of tracking error

4.2 ストループテスト

ストループテストの振動ありのときの結果は,反応時間の平均は 700.46 ± 56.48 msec,ばらつき度合である標準偏差の平均

は 104.28 ± 18.42 msec,正答率の平均は $93.48 \pm 5.11\%$ であった。振動なしのときの結果は,反応時間の平均は 695.81 ± 63.87 msec,ばらつき度合である標準偏差の平均は 103.47 ± 15.24 msec,正答率の平均は $92.57 \pm 5.59\%$ であった。反応時間の平均,ばらつき度合の平均,正答率の平均の振動ありのときと振動なしのときの間で有意差は見られなかった。

4.3 心拍変動 HF,LF/HF

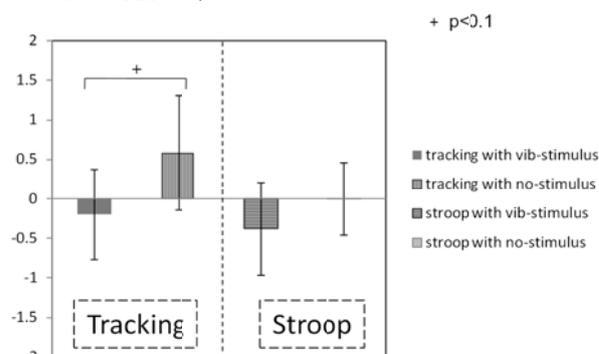


図7 心拍変動 HF

Fig.7 HF of heart rate variability

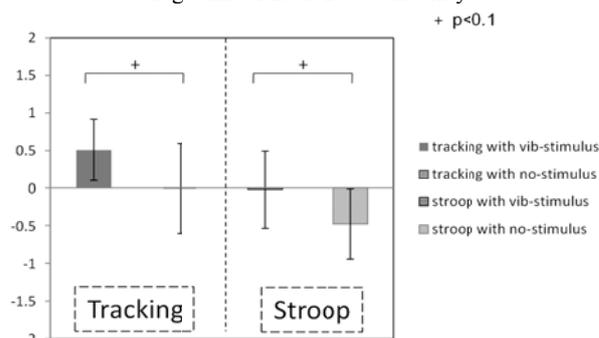


図8 心拍変動 LF/HF

Fig.8 LF/HF of heart rate variability

図7は被験者毎の HF の値を2つのタスクの振動ありと振動なしを合わせて正規化した後に標的追従課題とストループテストの振動ありと振動なしのときのグラフである。図8は被験者毎の LF/HF の値を2つのタスクの振動ありと振動なしを合わせて正規化した後に標的追従課題とストループテストの振動ありと振動なしのときのグラフである。標的追従課題のときの振動ありのときの心拍変動 HF は -0.198 ± 0.572 で振動なしのときは 0.580 ± 0.724 となった。ストループテストの振動ありのときの心拍変動 HF は -0.381 ± 0.589 で振動なしのときは -0.001 ± 0.461 となった。標的追従課題の振動ありのときの心拍変動 LF/HF は 0.507 ± 0.410 で振動なしのときは -0.006 ± 0.601 となった。ストループテストの振動ありのときの心拍変動 LF/HF は -0.023 ± 0.515 で振動なしのときは -0.001 ± 0.461 となった。標的追従課題の心拍変動 HF の振動ありと振動なしの間には $p=0.073 < 0.1$ の統計的有意傾向が見られた。標的追従課題,ストループテストのとき共に,振動ありの時と振動なしのときの心拍変動 LF/HF

の間にはそれぞれ $p=0.085<0.1$ と $p=0.093<0.1$ の統計的有意傾向が見られた。

4.4 脳内酸素化ヘモグロビン濃度

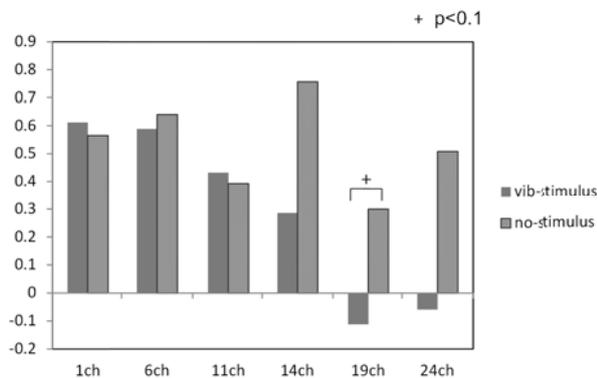


図9 標的追従課題 δ -oxyHb

Fig.9 Tracking task δ -oxyHb

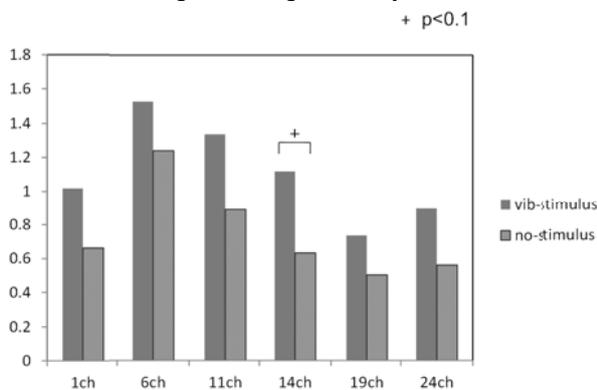


図10 ストロープテスト δ -oxyHb

Fig.10 Stroop test δ -oxyHb

脳内酸素化ヘモグロビン濃度変化(oxyHb)は前頭連合野に位置する1,6,11chと体性感覚野に位置する14,19,24chを解析対象とした。図9は標的追従課題時の δ -oxyHbの振動ありと振動なしの条件下での実験結果であり、図10はストロープテスト中の δ -oxyHbの振動ありと振動なしの時の実験結果である。1,6,11chは被験者10人の加算平均の結果である。また、ある一人の被験者で14,19,24chで計測できていなかったため、14,19,24chでは被験者9人の加算平均のグラフである。標的追従課題時は1,11chでは前頭連合野で δ -oxyHbが振動ありのときのほうが振動なしのときより大きいものに対し、6,14,19,24chでは δ -oxyHbが振動なしのときのほうが大きいという結果になった。ストロープテスト時は1,6,11,14,19,24chすべてで振動ありよりも振動なしのときの方が大きいという結果になった。標的追従課題時の19chでは $p=0.053<0.1$ 、ストロープテスト時の14chでは $p=0.052<0.1$ の統計的有意傾向がみられた。

5. 考察

標的追従課題の標的追従誤差およびばらつき度合は、振動ありの時のほうが振動なしのときに比べて小さくなっている。このことから振動呈示時の方が標的の追従が安定していることがわかる。心拍変動 HF の実験結果では、標的追従課題、ストロープテスト共に、振動ありの時のほうが振動なしの時よりも小さいことがわかる。一方、心拍変動 LF/HF の実験結果は振動ありのときの方が振動なしのときに比べて大きいという結果になっている。このことから、振動ありの時は交感神経系優位であり、振動なしの時は副交感神経系優位であることがわかる。振動呈示時は交感神経系優位であるため、適度な緊張状態を保てたことにより単調な作業のパフォーマンスが向上したと考えられる。振動ありのときに標的追従課題のパフォーマンスが向上したことに加え交感神経系優位であるため、標的追従課題のような単調な作業には振動刺激の呈示が有用であることが示唆された。

標的追従課題時の1,6,11chの δ -oxyHbは振動の有無で大きな差がみられなかった。一方、標的追従課題時の14,19,24chでは振動ありのときの方が振動なしのときに比べて小さい値となっている。このことから振動ありの標的追従課題時には体性感覚野のoxyHbが下降傾向にあり、体性感覚野の活動が抑制されていることがわかる。ストロープテストのときの δ -oxyHbはすべてのチャンネルにおいて振動ありの時のほうが、振動なしのときに比べて大きい値となっている。そのため、前頭連合野、体性感覚野共に振動ありの時の方のoxyHbが上昇傾向であることがわかり、振動ありの時のほうが活性していることがわかる。

本研究では前頭連合野の活動とパフォーマンスに関係があるという仮定の元で研究を行ったが、パフォーマンスが向上した標的追従課題時には振動の有無で前頭連合野に差異がみられなかったのに対して、パフォーマンスに差異がみられなかったストロープテスト時には前頭連合野に差異がみられた。今回の実験では2名の被験者がタスク中にoxyHbの濃度が減少する傾向がみられた。これはoxyHbが減少し、DeoxyHbが増加するということがあると先行研究で報告されており[13]、この2名はoxyHbが減少しDeoxyHbが増加したと考えられる。今後はこのような被験者を考慮して解析を行う必要がある。また独立成分分析などを用い脳活動由来信号と皮膚血流信号を分離除去することによって、改善できる可能性があるため、他の解析方法を検討する必要がある。

標的追従課題とストロープテストの δ -oxyHbを比較すると、振動の有無で14,19,24chの体性感覚野の活動に違った結果が得られた。振動呈示時に、標的追従課題時には体性感覚野に抑制がみられたのに対して、ストロープテスト時は活性がみられた。また、振動呈示時のパフォーマンスの結果は、標的追従課題時では向上したのに対して、ストロープテスト時では振動の有無によって差異がみられなかった。このことより体性感覚野

の活動状態とパフォーマンスになにかしらの関係があることが示唆される。これは、体性感覚野以外の脳の部位に oxyHb の濃度化が上昇している可能性を示している。その部位の oxyHb の濃度が上昇したことによって、パフォーマンスの結果が上昇したと考えられる。そのため、今回は前頭連合野と体性感覚野の解析に焦点を当てたが、他の脳の部位の計測、解析を検討する必要がある。

6. おわり

今回の実験では標的追従課題のような単調な作業には振動刺激の呈示がパフォーマンスの向上、交感神経系優位になるという点で有用であることがわかった。自動車運転中に振動刺激を呈示することによって、操作ミスのようなヒューマンエラーに起因する事故を減らせる可能性が示唆された。今後、高周波刺激だけではなく、低周波刺激を用いることや、タスク中の振動刺激に対する順応も考慮した振動間隔と振動時間の検討も必要である。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業(平成 25 年～平成 29 年)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 大見拓寛: 運転者の居眠り状態評価の画像センサ; 人工臓器 42 巻 1 号, pp99-103(2013)
- [2] 高野研一, 吉野賢治, 長坂彰彦: 生体情報を利用した精神作業負荷の評価に関する基礎的研究; 産業医学, Vol.32, pp.105-117(1990).
- [3] 志村孚城: 近赤外分光法による前頭前野計測—認知小の早期発見とリハビリテーション方法の評価—, pp. 18-19, コロナ社, (2009).
- [4] Sowell ER, Thompson PM, Leonard CM, et al: Longitudinal mapping of cortical thickness and brain growth in normal children. J Neurosci. vol.24, pp. 8223-8231, (2004).
- [5] Ofen N, Kao YC, Sokol-Hessner P, et al.: Development of the declarative memory system in the human brain, Nat Neurosci, vol.10, pp.1198-1205, (2007).
- [6] Roland S. Johansson, Göran Westling: Tactile Afferent Signals in the Control of Precision Grip. Attention and Performance. vol.13, pp. 677-713, (1990).
- [7] 宮岡徹, 間野忠明: 手指および手掌における振動感覚の順応. The Japanese Journal of Psychonomic Science. vol.5, pp. 63-69, (1986).
- [8] 志村孚城: 近赤外分光法による前頭前野計測—認知小の早期発見とリハビリテーション方法の評価—, pp. 62-66, コロナ社, (2009).
- [9] 福田正人: 精神疾患と NIRS—光トポグラフィー検査

による脳機能イメージング—, pp. 25-59, 中山書店, (2009).

- [10] Peifang Thian, et al, Cortical depth-specific microvascular dilation underlies laminar differences in blood oxygenation level-dependent functional MRI signal. vol.107, pp.15246-15251, (2010).
- [11] Taoka T, Iwasaki S, Uchida H, et al.: Age correlation of the time lag in signal change on EPI-fMRI, J Computer Assisted Tomography, vol.22, pp.514-517 (1998).
- [12] H.Iwasaki, H.Hagiwara: Availability and future prospects of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) in usability evaluation, Human Factors and Ergonomics. vol.27, pp. 6368-6377, (2012).
- [13] 田村守, 近赤外光による脳機能計測(生体計測技術の新展開), 精密工学会誌. vol.62, pp.1553-1556 (1996).

著者紹介

杉本 潤哉 (学生会員)



1990 年 10 月 7 日生。2013 年 3 月立命館大学情報理工学部知能情報学科卒業。同年 4 月立命館大学大学院情報理工学研究科人間情報科学コース入学、現在に至る。主に NIRS による脳内活動計測の研究に従事。モバイル学会, 日本

人間工学会関西支部の会員。

萩原 啓 (正会員)



1953 年 5 月 25 日生。1977 年大阪大学基礎工学部生物工学科卒業。同年松下電工株式会社入社。電器 R&D センター健康科学研究所主幹研究員を経て 2003 年立命館大学へ。現在、立命館大学情報理工学部知能情報学科教授。博士(医学)。生体情報計測評価技術, 特に睡眠・覚醒・生体リズムの研究に従事。モバイル学会, 日本生体医工学会, ヒューマンインタフェース学会, 日本人間工学会の会員。