

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：32657

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630179

研究課題名(和文)皮膚低周波刺激での身体図式改変によるビークル操作熟達支援

研究課題名(英文) Enhancement of driving skill by a modification of the body schema induced by endermatic low-frequency stimulus

研究代表者

鈴木 聡 (Suzuki, Satoshi)

東京電機大学・未来科学部・准教授

研究者番号：20328537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：ビークル操作時の車両感覚と関係深い身体図式に着目し、経皮低周波刺激で操作者の身体図式改変を誘導する運転操作支援法の要素研究を2年間実施した。経皮的抹消神経電気刺激(TENS)に注目し、身体図式の改変程度を識別し得る脳計測部位を視覚-体性感覚不一致課題等と近赤外線脳血流計測で調査し、鳥口上腕靭帯付近へ刺激印可と下頭頂小葉での拳動検出の有効性($p<0.01$)を確認した。そして車両感覚向上支援法の効果を運転シミュレータでの車線維持課題(被験者数約80名)で検証し、身体図式改変をTENSで誘導する運転支援法の有効性を確認した($p<0.001, N=640-790$)。

研究成果の概要(英文)：By focusing on body schema which relates to a feel of the width of vehicle on its driving, an elemental study for its driving assistance method inducing the artificial modification of body schema by endermatic low-frequency stimulus was undertaken in two years. Possibility of the artificial modification by transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) was investigated by monitoring brain activity on cortex areas using the NIRS measurement system with an experimental test mismatched between visual and somatic sense, then availability of stimulus into coracohumeral ligament and body-schema feature detection at inferior parietal lobule were confirmed. Based on these results, an assist method to enhance a feel of the width of vehicle was presented, and its effectiveness was investigated using a lane-keeping task on driving simulator for about 80 participants. As a result, the effectiveness was significantly confirmed (one-way ANOVA, $p<0.001, N=640-790$)

研究分野：システム科学

キーワード：身体図式 支援制御 経皮低周波刺激 熟達 ドライビングシミュレータ

1. 研究開始当初の背景

身体図式 (body schema: 身体の延長感覚) の研究は脳計測法の進歩と共に進展し, 国内では, サルの脳の fMRI 解析[入来:1996,2004], 海外ではサルによる BMI マニピュレータ操作[Schwartz, Nature: 2008]など先駆的な研究が進められていた. 身体図式には視覚と触覚のバイモダルニューロン [Rizzolatti, Mirrors in the brain: 2006] が関係しており, ピノッキオ錯覚[Lackner, Brain: 1988]や胴体縮小錯覚[Ehrsson, Biol.: 2005]など, 筋肉の筋紡錘への低周波振動で視覚情報の統合処理に介入すると, 錯覚を誘発, すなわち身体図式を人工的に変容できることが報告されていた.

また, 身体図式の変容は, 手で道具を使う時のみならず, 移動機械の操作にも関係し, 所謂"車両感覚"も身体図式の変容の一つである. しかし, 機械操作支援といった工学の観点から身体図式を活用する研究はまだ少なかった.

そこで本研究代表者は, 移動機械の周囲環境の状態に応じて低周波刺激を何らかの方法で操作者に与えることで, 車両感覚を向上させる工学応用への展開を考え, 本研究代表者が長らく取り組んできた機械操作熟達研究(熟達化の脳機能解析, 支援制御系設計, 生体信号からの熟達推定など)の手段・成果を統合的に活用し, 身体図式に関係する脳挙動の調査と支援法の研究に着手した.

2. 研究の目的

移動機械操作の熟達化に重要な車両感覚の体得に関し, その感覚の元となる身体図式の変容を適切に誘導する手法の有効性を実験的に確認することを本申請研究の主目的とした. 具体的には, 経皮低周波刺激を身体図式改変刺激とし, 近赤外光脳血流量計測で身体図式変容の特徴的挙動を調査し, 模擬運転実験で提案する支援法の効果を検証・分析した.

3. 研究の方法

初年度では, **予備実験による経皮低周波刺激での車両感覚支援効果の確認, 脳機能計測による身体図式改変の客観指標の探究**に取り組んだ. そして次年度で, **経皮低周波刺激の最適条件の探索, 車両感覚向上支援法の効果分析**を行った. 以下項目 ~ について述べる.

(1) 予備実験での支援効果確認【項目】

現有の運転シミュレータを中核に, 近赤外光脳血流量計測装置 (NIRS: 日立メディコ社製 ETG-4000, 48ch) と生体信号計測装置 (TEAC 社製 PolymateII AP216, 16ch), 経皮低周波刺激発生装置 (音振動もしくは経皮的抹消神経電気刺激:TENS) を統合して, 車両感覚支援

実験システムを構築した. 本運転シミュレータの座席部は, 実車のインパネ・運転シートと 120 インチ 3 面スクリーンとで構成されており, dSPACE 社の MotionDesk と Automotive Simulation Models とハプティックハンドル・アクセルシステムを用いて, 実車動特性と仮想運転映像・音環境を極力忠実に再現した [14]. これにより, 視覚・触覚・聴覚情報を適切に被験者に与えられる, 没入感・臨場感の高い仮想運転環境を構築し, 後述の項目の最適条件調査作業と並行して, 経皮低周波刺激による車両感覚運転支援の可否を調べた.

(2) 身体図式改変の客観指標の探究【項目】

身体図式改変の発生有無や強度を計測できる方法があれば, 身体図式変容手段の優劣を判定しやすい. そこで電磁気的環境ノイズや体動アーチファクトにも比較的頑強な NIRS を用いて, 身体図式変容時の特徴を調査した. 最初に身体図式に関連深いバイモダルニューロンに干渉し得る視覚-体性感覚不一致タスクを用い, 身体図式変容の有無で反応に差が生じる脳部位を探索した. 次に身体図式変容の判定可能な見込みのある脳部位を特定した上で, 後述の項目の運転支援実験中に脳計測も行い, 運転支援時にも同様の脳挙動が現れているか調査した.

(3) 刺激の最適条件調査【項目】

過伸展錯覚など筋紡錘に振動を与えることで生じる運動錯覚の条件を参考にして, 経皮低周波刺激法の周波数や刺激印可箇所などの条件を探索した. 刺激手段は, 音振動刺激と電気刺激の 2 種とし, 運動錯覚がどの程度得られるか, また NIRS 計測でその差異が検出できるかなどを, 種々条件を変えて調査した.

(4) 車両感覚向上支援法の効果分析【項目】

項目の予備実験の結果と, 関連分析の途中経過を踏まえ, 運転シミュレータのテストコースの再設計, 実験・計測シナリオの改良, 低周波刺激装置の改良を図って, 本支援法の効果を調べるための被験者実験を実施した.

4. 研究成果

(1) 予備実験での支援効果確認【項目】

運転シミュレータを用いて簡易車両感覚支援実験 (被験者 20 名) を試行錯誤的に行った. その結果, 操作者の鳥口上腕靭帯付近に微弱な TENS 刺激を与えることで, 車体感覚が必要なピークル操作性能が向上する傾向を確認した [14]. これにより, 本研究の基本コンセプトの妥当性が確認できたと判断し, 当初計画に沿って研究を進めた.

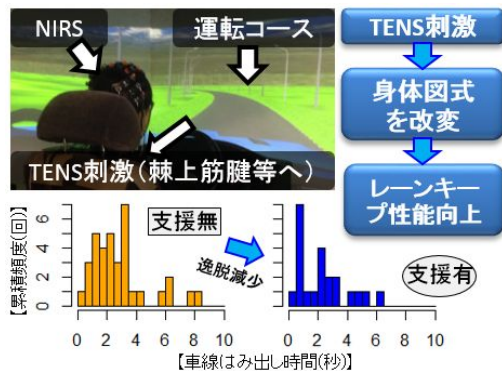


図1 予備実験風景と支援効果の結果例

(2) 身体図式改変の客観指標の探究【項目】

ビデオカメラ/モニタで視覚情報を光学的に変えて被験者に与える、視覚-体性感覚不一致タスクを用いて、身体図式改変の学習中の脳活動を NIRS で計測した。身体図式の関与が報告されている幾つかの脳部位の賦活変化を分析したところ、下頭頂葉小葉の賦活変化が視覚体性感覚不一致の程度に応じて有意に($p < 0.01$)変わることを確認した[9,10] (図2)。これにより、身体図式改変の有無を判定できる計測・分析法の一つを見いだせた。

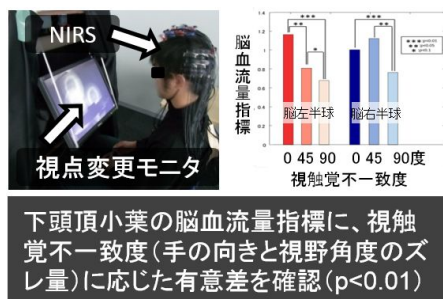


図2 視覚-体性感覚不一致実験と結果

また後述の項目の運転支援実験時に、同部位の脳血流量変化を分析したところ、特定の高周波成分が、TENS 刺激時と実体的な身体図式改変時(手で道具を実際に使用した場合)の双方で観測されることを確認した[雑誌論文1,学会発表3]。このことから、本特徴的挙動は TENS 刺激に対する単なる反応ではなく、身体図式拡張に由来する可能性が高いことが示された。

(3) 刺激の最適条件調査【項目】

最初に、ボディソニック用トランスデューサを用いて、運動錯覚の既存研究で用いられている低周波音振動刺激による運動錯覚の再現実験を行った。しかし運動錯覚の誘発率は3~4割に留まり[12]、十分でなかったため、低周波音振動刺激方式は棄却した。

次の候補として、経皮微弱電気刺激である TENS に注目し、運動錯覚を誘発する腱振動刺激相当の条件(周波数・刺激強度・刺激印

可部位等)を幾つか変えて、予備実験(項目)を行ったところ、前述したように車体感覚向上効果が見られたので、本刺激方法を採用した。

また同予備実験で、TENS 強度に対する知覚に個人差があることが認められたので、個々人に対して JND 調査を行うこととした。具体的には、上昇法と下降法とで主観的に知覚できる閾値を特定し、その 0%、75%、125% の強度をそれぞれ、刺激無 (NA)、知覚不能刺激 (IA)、知覚可能刺激 (AA) として設定し、後述の項目の実験条件の一つとした。

(4) 車両感覚向上支援法の効果分析【項目】

被験者毎に TENS 刺激知覚閾値を測定し、電流刺激条件の個人調整(項目に相当)を図った上で、3種の TENS 強度(刺激無:NA、知覚不能刺激:IA、知覚可能刺激:AA)と、2種の運転視点(運転席:Seat、車上:Roof)の計6通りで被験者実験(約80名)を行い、道路壁面から距離を維持して運転するレーンキープタスクを用いて支援法の効果を調べた。

まず収集データのスクリーミングを行い、車両感覚向上の指標として中央車線からの逸脱時間分布について、Box-Cox 変換/正規化検定を行い、続いて NA-IA-AA の3群比較を行ったところ、 $NA > IA > AA$ の順に有意に減少していることが確認できた(one-way ANOVA: $p < 0.001, N = 640-790$)。続いて、逸脱累積時間の長短に応じて初心者群と熟達者群に分けて精査したところ、運転不慣れな初心者の場合には Seat-IA 刺激で、Seat では慣れているものの Roof 視点には不慣れな上級者の場合は Roof-IA 条件で、それぞれ運転支援効果が見られた。つまり、操作者の保有技能のタイプにもよるが、操作者が知覚できない微弱な経皮刺激で車体感覚向上支援がなされていることが結論付けられた。

以上により、項目 ~ に示した本研究の目的は大方達成された。つまり TENS 刺激で身体図式改変に干渉して車体感覚向上に関わる運転支援が可能であることを示し、さらに脳血流量計測で身体図式改変を客観的に検出し得ることを示せた。

(5) 成果公開

本研究で得られた成果は、国際会議で企画した特別セッション (RISP NCSP2014 /2015, RO-MAN2013) や国際会議、研究会、招待講演 (IEEE IROS2013, invited talk) で発表した。また、本研究に関わる成果発表で、奨励論文賞[9]と Student Paper Award[3]を受賞した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3件)

[1] Noriko Kimura, Akira Ichinose, Takumi Matsumura, and Satoshi Suzuki, "Biosignal detection of expansion of body schema induced by TENS on driving," Journal of Signal Processing, RISP, Vol.19, No.4, 2015

- (in press).
- [2] 木村 宜子, 一之瀬 彬, 鈴木 聡, "高速運転中の足裏の踏力に関する動的 JND 計測," 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌) IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol.135, No.4, pp.351-355, DOI:10.1541/ieejieiss.135.351, 2015.
- [3] Satoshi Suzuki, Asato Yoshinari, and Kunihiro Kuronuma, "Development of estimating equation of machine operational skill by utilizing eye movement measurement and analysis of stress and fatigue," Advances in Human-Computer Interaction Volume 2013, Article ID 515164, 13 pages, 2013.

[学会発表](計 14 件)

- [1] Akira Ichinose, Takumi Matsumura, Noriko Kimura, and Satoshi Suzuki, "Preliminary experiments to the develop of assistance system of driving skill using expansion of body schema," in Proc. of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT2015), Sevilla, Spain, March 17-19, 2015, pp.429-433.
- [2] Yusuke Murata and Satoshi Suzuki, "Electrical muscle stimulation to be activated inferior parietal lobule by modification of body schema," in Proc. of 2015 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, NCSP'15, Kuala Lumpur, Malaysia, February 27-March 2, 2015, pp. 174-177.
- [3] Noriko Kimura, Akira Ichinose, Takumi Matsumura, Satoshi Suzuki, "Verification of expansion of body schema induced by TENS on driving," in Proc. of NCSP'15, Kuala Lumpur, Malaysia, February 27-March 2, 2015, pp. 170-173, **Student Paper Award**.
- [4] Soh Iizuka, Takahiko Nakamura, and Satoshi Suzuki, "Robot Navigation in Dynamic Environment using Navigation function APF with SLAM," IEEE Mecatronics 2014, Nov. 27-29, 2014, Tokyo, Japan, pp.89-92.
- [5] 一之瀬 彬, 鈴木 聡, "運転時の操作者視点及びTENS支援の視触覚統合と身体図式の検証," 電気学会知覚情報研究会, 横浜, 神奈川, 9/1, 2014, PI-14-056 (査読なし)
- [6] 松村 拓海, 鈴木 聡, "経皮電気刺激を用いた車線逸脱防止支援システム," 電気学会知覚情報研究会, 横浜, 神奈川, 9/1, 2014, PI-14-057 (査読なし)
- [7] 木村 宜子, 鈴木 聡, "TENS 刺激による運転支援時の身体図式改変の検証," 電気学会知覚情報研究会, 横浜, 神奈川, 9/1, 2014, PI-14-074 (査読なし)
- [8] 木村 宜子, 一之瀬 彬, 鈴木 聡, "高速運転時における足裏の力に関する動的弁別閾の計測," 電気学会知覚情報研究会, 大崎, 東京, 4/25, 2014, pp.25-29 (査読なし)
- [9] 村田 祐輔, 島津 卓也, 鈴木 聡, "脳機能測定を用いた身体図式改変の客観的評価," 電気学会知覚情報研究会, 大崎, 東京, 4/25, 2014, pp.31-35 (査読なし), **奨励論文賞受賞**.
- [10] Takuya Shimazu and Satoshi Suzuki, "A preliminary study of functional brain activity concerning modification of a body schema on hand manipulation," in Proc. of NCSP'14, Hawaii, USA, Feb. 28, 2014, pp.553-554.
- [11] Akira Ichinose, Takumi Matsumura, and Satoshi Suzuki, "Driving assistance system using expansion of the body schema," in Proc. of NCSP'14, Hawaii, USA, Feb. 28, 2014, pp.701-704.
- [12] 岸野 涼, 島津 卓也, 鈴木 聡, "運動錯覚を用いた身体図式改変手法の実験的研究," 電気学会次世代産業システム研究会:"人間支援技術の研究", 東京, 3/4, 2014 (査読なし)
- [13] Satoshi Suzuki, "Human Adaptive Mechatronics and Human-System Modeling," **invited talk**, in workshop of Robotic Assistance Technologies in Industrial Settings (RATIS), The 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013), November 7, 2013, Tokyo, Japan.
- [14] Akira Ichinose, Yosuke Gomikawa, and Satoshi Suzuki, "Driving assistance through pedal reaction force control with consideration of JND," in Proc. of the 22nd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN2013), Gyeongju, Korea, August 28, 2013, pp.484-489.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

鈴木 聡 (SUZUKI SATOSHI)
東京電機大学・未来科学部・准教授
研究者番号：20328537

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし