

自動走行ストレス～拡張現実提示によるストレス軽減の試み～

笹井 翔太^{※1} 北原 格^{※2} 亀田 能成^{※2} 大田 友一^{※2}

神原 誠之^{※3} 浮田 宗伯^{※3} 池田 徹志^{※4} Yoichi Morales^{※4} 萩田 紀博^{※4} 篠沢 一彦^{※5}

※1, ※2 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

※3 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

※4 国際電機通信基礎技術研究所(ATR)知能ロボティクス研究所 〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2-2

※5 大阪教育大学 教育学研究科 〒582-8582 大阪府柏原市旭ヶ丘 4-698-1

E-mail: ※1 s1420788@u.tsukuba.ac.jp, ※2 {kitahara, kameda, [ohata](mailto:ohata@iit.tsukuba.ac.jp)}@iit.tsukuba.ac.jp,

あらまし 本稿では、自動走行時に搭乗者が感じるストレス（自動走行ストレス）の軽減に向けた試みについて述べる。搭乗者に不安を与える視覚的要因を、拡張現実感を用いて解消するシステムを構築し、生理指標計測実験を通じて、ストレスがどのように変化するかを調査する手法を提案する。本システムは、拡張現実感を用いて、車両前方の死角である道路平面の映像をダッシュボード上にシースルー映像として提示し、映像中に仮想の車輪軌道を重畳する手法である。本システムにより、死角領域中の路面状況と、自車両の進行経路といった視覚情報を搭乗者が容易に把握することができるため、道幅の狭い道路を自動走行する際の搭乗者のストレスを軽減できると考えている。

キーワード 自動走行, 高度交通システム (ITS), 拡張現実感, ストレス度, LF/HF, Skin Conductance

1. はじめに

2013年に閣議決定された「世界最先端 IT 国家創造宣言」では、2018年を目途に交通事故死者数を2500人以下とし、2020年までに世界で最も安全な道路交通社会を実現するために、車の自律系システムと車と車、道路と車との情報交換等を組み合わせ、2020年代中には自動走行システムの試用を開始するとしている[1]。それを受け、国内外の自動車メーカーを中心とした産業界では、自動走行システムの研究開発を加速している[2][3]。学術界でも、DARPA主催の“Grand Challenge”[4]に代表されるように、最先端のセンシング・環境理解技術に基づく自動走行システムの研究開発が進んでおり、一部では実際の道路環境での走行に耐えうるシステムが実現しつつある[5][6]。

上述した国家戦略で2020年代中に実現を目指している自動走行は、緊急時のみ搭乗者が対応する準自動走行（自動化レベル3）を想定しており、搭乗者が一切の運転に関与しない完全自動走行（自動化レベル4）は、その先の目標として掲げられている。

自動車の利用目的の一つは、我々人間の移動であることを考えると、自動走行システムが広く普及するためには、高度な走行制御に加え、搭乗者が安心して快適に過ごせるシステムの実現が必要であろう。しかし

ながら、準自動走行では、搭乗者は常に運転状況を把握し、緊急時に回避行動をとる必要があるため、搭乗中も大きなストレス（自動走行ストレス）を感じ快適性が低下することが容易に想像される。それにも関わらず、自動走行車に搭乗する人間の快適性向上を目的とした研究は、未だ例をみない。

拡張現実（AR: Augmented Reality）は、仮想世界の情報を現実世界にシームレスに重畳・提示する技術であり、実世界（道路・車両）と仮想世界（車両制御・センサ情報）両方の情報提示が必要な自動走行システムとの親和性が高く、これまでも、交差点での右直事故[7]や左折時の巻き込み事故[8]の防止を目的とした運転者支援システム、道路地図の上空提示[9]など、活発な研究活動が行われている。

本研究の目的は、拡張現実インタフェースを活用することにより、自動走行車に搭乗する人間の快適性を向上させることである。本稿では、我々が開発した、車体の一部（例えばダッシュボード）を投影型拡張現実提示によって“透明化”することにより、自動走行車両の走行状態や周辺状況を搭乗者に提示する方式[10]を紹介し、それを用いて自動走行ストレスの軽減を目的とした取り組みについて述べる。生理指標計測技術を導入することで、より直接的かつ正確に自動走行ストレスの分析を行う。

2. 投影型拡張現実提示による車体の透明化

自車両周囲の環境には、自動車の構造上、搭乗者が視認することのできない死角領域が存在し、事故の原因となっている。この死角領域を可視化するため、拡張現実感を用いた手法が提案されている。吉田らは、車両外壁に設置したカメラで、車両の内壁によって運転者から死角となる領域を撮影し、それを運転者視点から観察される見え方に変換した後、内壁に投影する手法を提案している[11]。内壁を仮想的に透明化することで、仮想世界と車両周囲の実世界との幾何学的整合性を再現したシースルー映像提示を実現しているが、搭乗者が路端と車輪との位置関係や自車両の進行経路を把握するための情報が十分に提供されているとはいえない。それに加え、自動走行車両の搭乗者は、車両がどのような状況理解に基づいて制御されているのかわからないと、不安になることが予想される。

本研究では、投影型拡張現実提示を用いて実現した車体のシースルー提示上に、車両の走行状況を示す仮想情報を実時間重畳提示することにより、搭乗者のストレス軽減を目的とした提示システムを提案する、

3. 投影型シースルーダッシュボードを用いた車輪軌道のAR提示

搭乗者の視界には、車体や他の車両、さらには道路脇の建物などによって死角領域が生じる。特に、道幅の狭い道路を走行する際は、死角領域の状況を把握し難くなるため脱輪や接触などの不安によりストレスが増加することが予想される。また、自動走行車両が、搭乗者の意図と異なる経路を走行したり、ハンドル・ブレーキ操作をしたりすると、搭乗者のストレスが上昇する問題が存在する[12]。

本システムでは、投影型拡張現実提示を用いて、自車両のダッシュボードを透明化したシースルー映像を提示することにより、死角領域である道路面の観察を可能にする。さらに、シースルー映像上に、自車両の車輪軌道をAR提示することにより、自車両の進行経路を搭乗者に提示する。死角領域を含む路面状況と自車両の走行状況を観察することが可能になるため、道幅の狭い道路を走行する際に生じる搭乗者の不安の軽減が期待される。

図1に提案システムの全体図を示す。世界座標系を X_w 、ビデオプロジェクタ座標系を X_p 、カメラ座標系を X_c 、搭乗者視点座標系を X_d とする。車両のフロントグリルに設置したカメラで前輪付近の死角領域(道路面)を撮影する。撮影した映像を2次元射影変換し、生成された映像を搭乗者視点近くに設置したプロジェクタ

によりダッシュボード上に投影する。

適切な射影変換を施すことにより、ダッシュボード上に提示される映像と車両周囲の実世界との幾何学的な整合性が再現され、あたかもダッシュボードが透明になったようなシースルー映像提示が実現される。ダッシュボードの形状は車種によって多様に変化するが、本システムではダッシュボードを複数の平面で形状近似することにより、様々な車種に対応する。ダッシュボードに再帰性反射素材を貼り付けることで、昼間の車内でも鮮明な提示映像の観察を可能にする。

AR提示する車輪軌道は、ハンドルに設置した加速度センサの観測値から操舵角を推定し、その値から算出した前輪および後輪の軌道をCGで可視化・レンダリングしたものを、シースルー映像上の適切な位置に重畳する。

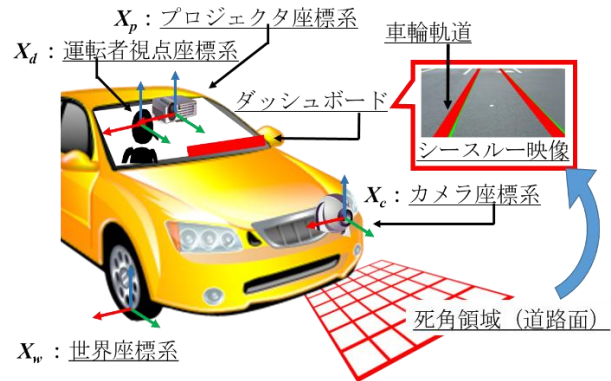


図1 提案システムの全体図

3.1 シースルー映像の生成

死角撮影カメラで撮影した映像を、そのままダッシュボード上に投影すると、搭乗者の視点位置(X_d の原点)とカメラ位置(X_c の原点)、およびプロジェクタ投影中心位置(X_p の原点)が異なるため、搭乗者の視点位置で観察される投影映像と車両周囲の実世界の見え方の間に幾何学的な不整合性が発生する。本システムでは、2次元射影変換を撮影映像に適宜施すことにより、この不整合を補正する。実際には、ダッシュボードを複数の平面領域に分割し、各々において2次元射影変換を推定する必要があるが、ここでは説明の簡単化のため、単一の平面(小領域)に対するシースルー映像の生成処理について述べる。

図2に示すように、道路面上の4点を R_i 、小領域上の対応する4点を S_i ($i=1,2,3,4$)とする。このとき、点 S_i は搭乗者視点と道路面上の4点 R_i を結んだ直線上にある。死角撮影カメラで撮影した路面上の点 R_i が、小領域上の点 S_i に投影されるように映像を変換することで、搭乗者は、小領域をシースルーしたような

道路面を観察することができる．道路面上の点 R_i が死角撮影カメラ画像上で観測される点 C_i ($i=1,2,3,4$)と，ダッシュボード上の点 S_i と対応するプロジェクタ画像上の点 P_i ($i=1,2,3,4$)のペアを 4 点以上求め，その対応情報から 2 次元射影変換行列 H を推定する． H を用いて死角撮影カメラ画像を射影変換することにより，シースルー映像を生成する．

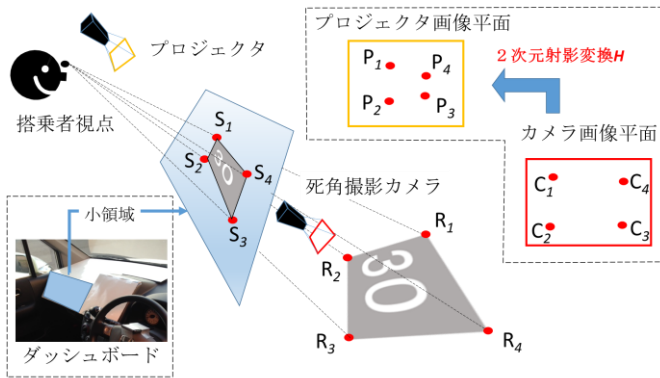


図 2 単一小領域に対するシースルー映像生成処理

3.2 車輪軌道の算出と重畳

ハンドルに設置した加速度センサの観測値から車両の操舵角を推定し，その値に基づきシースルー映像上に重畳する車輪軌道を描画する．前輪の舵角 θ は，図 3 に示す各車輪の旋回半径から幾何的に推定する．本推定では，車両が低速で走行していることを仮定しているため，速度が一定以上に達すると，旋回時に発生する遠心力により横すべりが生じ，回転半径の推定値に誤差が生じることが考えられる．しかし，狭い道でのすれ違いなど，低速走行での利用を想定しているため，遠心力による横すべりは考慮しないこととする．

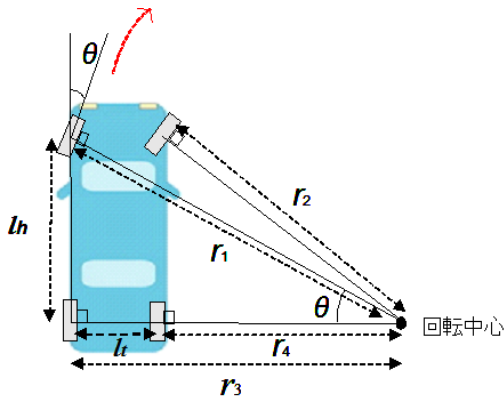


図 3 低速走行時における各車輪の定常旋回半径

旋回時における旋回外側の前輪の回転半径を r_1 [m]，その前輪の舵角を θ [rad]，前輪中心と後輪中心の間の長さであるホイールベースを l_h [m]とすると，そ

の関係は以下の式(1)のように表すことができる．また，各車輪の旋回中心は一点で交わっているため，各車輪の回転半径 (r_2, r_3, r_4) についても，同様に式(2), (3), (4)のように表すことができる．このとき， l_t [m]は前輪同士または後輪同士の幅であるトレッド長である．

$$r_1 = l_h \sin(\theta) \quad \dots (1)$$

$$r_2 = \sqrt{r_1^2 + l_h^2} \quad \dots (2)$$

$$r_3 = r_1 \cos(\theta) \quad \dots (3)$$

$$r_4 = r_3 - l_t \quad \dots (4)$$

算出した車輪軌道の CG を OpenGL などの CG ライブラリを用いて生成・レンダリングし，死角撮影カメラで撮影した画像中の道路面領域に重畳する．CG モデルを正確な位置に重畳するためには，実世界を撮影する死角撮影カメラと仮想世界を撮影する仮想カメラの世界座標系における位置・姿勢（外部パラメータ）と，カメラの焦点距離などの内部パラメータを正確に推定する必要がある．本システムでは，世界座標系での 3 次元位置・姿勢と大きさが既知のチェスボードを車両前方に設置し，それを撮影した画像に対して画像処理ライブラリ OpenCV に含まれる Zhang の手法[13]を適用することにより，死角撮影カメラの外部パラメータおよび内部パラメータを求める．求めた外部パラメータと内部パラメータに基づいて仮想カメラのパラメータを設定し，CG モデルをレンダリングすることにより，幾何的整合性を実現する．

図 4 に提案システムの提示例を示す．前輪軌道と後輪軌道を見分けやすくするため，前輪軌道を緑色，後輪軌道を緑色の反対色である赤色でレンダリングする．幾何学的な整合性が再現されたシースルー映像中に，車輪軌道の CG が重畳されていることがわかる．

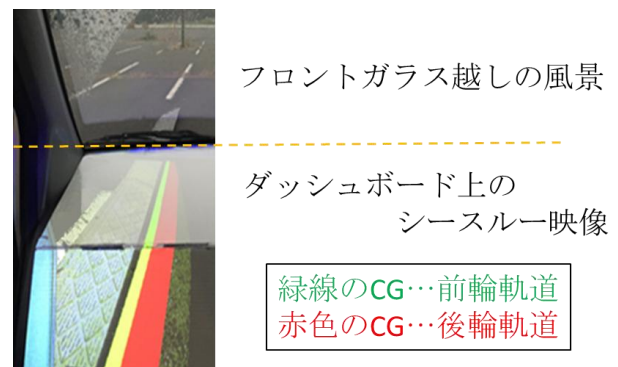


図 4 死角領域と車輪軌道の AR 提示

4 実験

死角領域の道路面の状況と、自車両の車輪軌道を AR 提示する本システムにより、自動運転時に搭乗者のストレスがどのように変化するののかに関する調査を実施した。本実験では、実験者の運転する車両の助手席に実験参加者が座ることで、実験参加者を自動運転車両の搭乗者と見立てて実験を行なった。

4.1 生理指標によるストレス度の判定

搭乗者のストレス度を判定するための生理指標として、LF/HF と Skin Conductance を用いる[14]。LF/HF は、心拍変動を周波数スペクトル解析した際の低周波成分(LF: 0.04~0.15Hz)と、高周波成分(HF: 0.15~0.40Hz) の比を示し、自律神経のバランスを推定する指標である。ストレス度を計測するための指標として広く用いられている。LF は交感神経と副交感神経に影響を受ける指標であり、HF は主に副交感神経の活動に影響を受ける指標である。ストレスを受けることで交感神経が活性化し、LF/HF の値が増加する。図 5 に示すように、ストレスを与えている区間と、与えていない区間といったようにグラフを分割し、区間毎で LF/HF の平均値を算出する。他の区間と比較して、平均値が大きければストレス度が高い、小さければストレス度が低いとする。

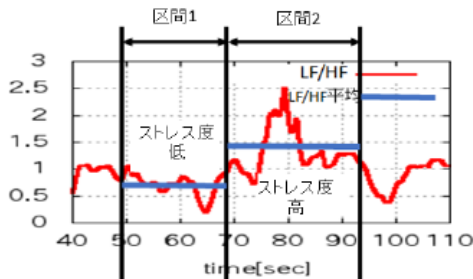


図5 LF/HF によるストレス度の判定[12]

Skin Conductance (SC)は、交感神経の活性化に伴い手掌部に生じる発汗を観測した指標である。図6のように、直前まで減少傾向、または横ばいであった値が大きく増加したとき、ストレス度が高いとし、減少傾向であるときをストレス度が低いとする。

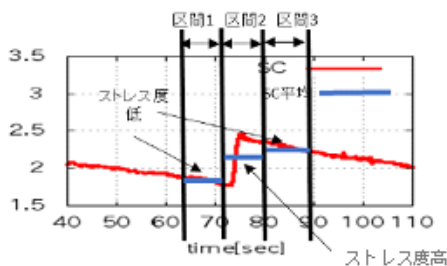


図6 Skin Conductance によるストレス度の判定[12]

ストレスを長く感じている状況では LF/HF が反応しやすく、瞬間的に大きなストレスを感じた状況では SC が反応しやすい傾向であることが報告されている[12]。また、ストレスを感じない平静時には、各生理指標のストレス度は横ばい、もしくは減少傾向にある[15]。

4.2 実験環境

搭乗者に、自動走行ストレスを与える環境として、図7に示すように、車幅に対して0.3m広い道幅2.0m、全長3.6mの直進コースを用意した。高さの低いブロックを用いて、道幅が狭い直進コースを構築することにより、死角領域中のブロックと車体との位置関係の把握が困難となり、搭乗者が不安を感じることを想定している。提案システムを用いて、車両前方の死角領域と車輪軌道を AR 提示することにより、ブロックと車輪との位置関係の把握が可能となり、搭乗者の不安軽減効果が期待される。

4.3 システムの構築

以下に紹介する機材を用いて提案システムを構築した。Lenovo 社製ラップトップ PC (ThinkPad E420 (CPU: Intel Core i7 2.80GHz, RAM メモリ: 8.00GB)) を用いて提示映像を生成した。死角領域の撮影には、USB カメラ Logicool 社 c270 (解像度: 1280 画素×720 画素, 水平画角: 60°) を使用し、生成映像を投影するビデオプロジェクタとして CASIO 社 XJ-A256 (輝度: 3000 ルーメン, 表示解像度: 1280 画素×800 画素) を使用した。ハンドルの操舵角を取得するため、富士通社 Android 端末 F-10D (OS: Android 4.2.2, CPU: NVIDIA Tegra3 AP33 1.5GHz クアッドコア, RAM メモリ: 1GB) に搭載された加速度センサを使用した。Android 端末により取得されたハンドルの操舵角は、Bluetooth 通信を介して映像処理用 PC へと送信される。

実験参加者には POLAR 社製の電極(ソフトストラップ)を装着し、心電センサおよび Mindfield Bio-systems 社製の発汗センサ (eSense Skin Response) を用いて、LF/HF と SC を 10Hz で計測する。

4.4 実験手順

実験参加者は、実験者が運転する車両の助手席に座り、LF/HF と SC の測定機器を装着する。実験車両は図7に示すように、時速約10kmで緩やかに右旋回しながら、道幅の狭い直進コースの進入口まで走行し、時速約3kmで直進コースに進入して通過する。実験参加者一人あたり、この試行を AR 有りと AR 無しの各2回(計4回)実施した。本稿では、実験参加者 A, B, C の三人に対して行った実験の結果について紹介する。

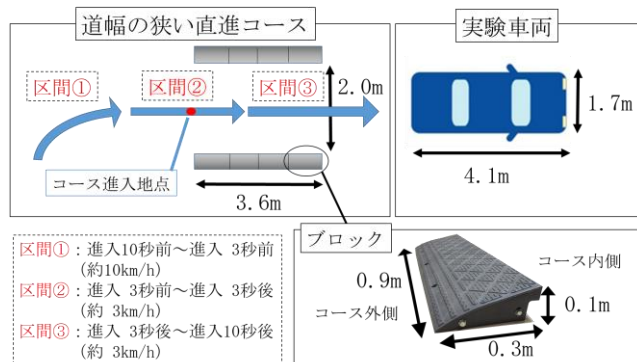


図 7 実験コースとストレス度比較のための3区間

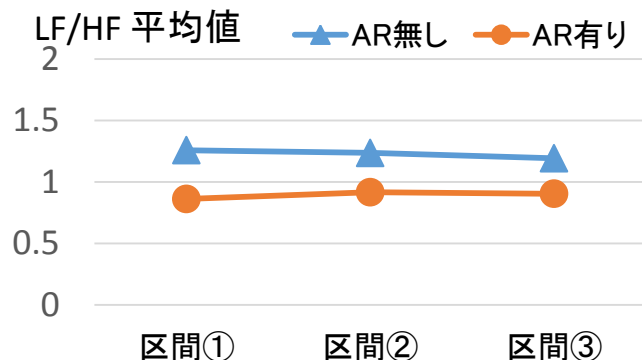


図 8 実験参加者 A の LF/HF ストレス度

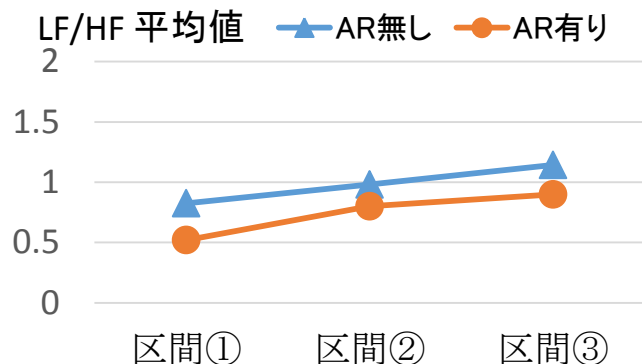


図 10 実験参加者 B の LF/HF ストレス度

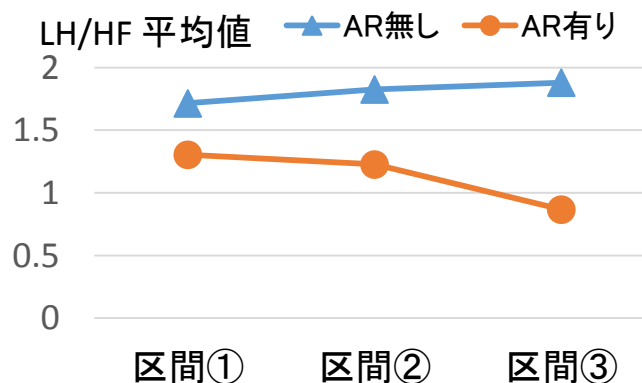


図 12 実験参加者 C の LF/HF ストレス度

4.5 実験結果

ストレス度を比較するため、図 7 に示すように、コース進入 10 秒前～コース進入 3 秒前（区間①）、コース進入 3 秒前～コース進入 3 秒後（区間②）、コース進入 3 秒後～コース進入 10 秒後（区間③）の 3 区間に分けて考える。

図 8、図 10、図 12 は、AR 有りの試行と AR 無しの試行ごとで、それぞれの走行区間における LF/HF の平均値を示したものである。また、図 9、図 11、図 13 は、各試行において区間ごとに測定された SC を示したものである。

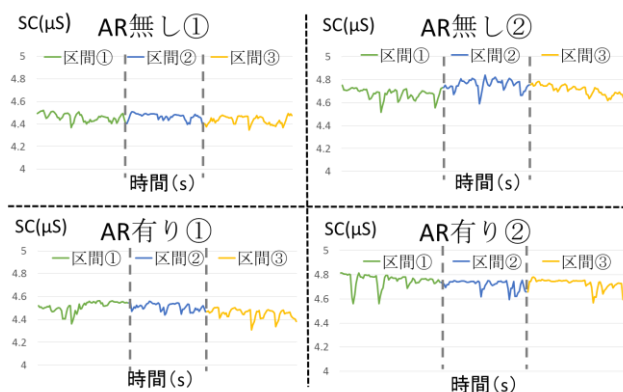


図 9 実験参加者 A の SC ストレス度

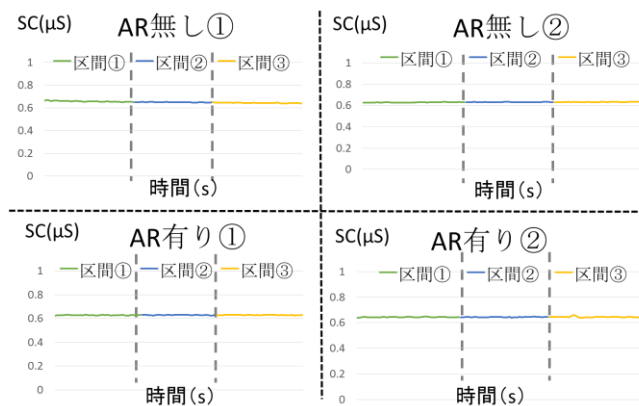


図 11 実験参加者 B の SC ストレス度

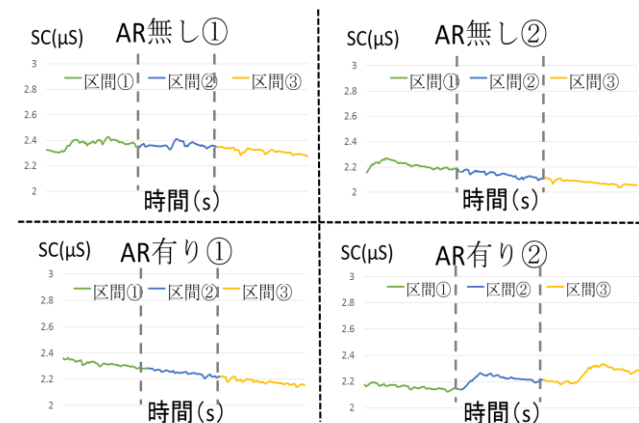


図 13 実験参加者 C の SC ストレス度

図 8, 図 10, 図 12 に示すように, AR が無い試行よりも AR が有る試行の方が, LH/HF の平均値が低い傾向が見られた. 一方, SC については, 図 13 中の右下図 (実験参加者 C: AR 有り②) のように, 一試行でストレス度の上昇が見られるが, 他の実験参加者の結果を見ると, AR の有無に関わらず, 概ね値の大きな増加が見られない傾向であった. このとき, $0.1[\mu S]$ 未満の変動はノイズとする.

4.6 考察

AR 提示によって, LF/HF の平均値が減少する傾向が見られたことから, 交感神経系の活動を軽減する傾向にあると思われる. また, AR の有無に関わらず, 各区間で SC の大きな増加が見られなかったことから, 搭乗者は実験中に刺激の強いストレスは感じていなかったと考えられる. これは, 実験車両が低速であったため, 実験参加者に強いストレスを与えることができなかったからであろう.

5. おわりに

本研究では, 拡張現実感(AR)を用いることで, 自動走行時に搭乗者が感じるストレスの軽減を試みる実験を行った. 走行車両の死角領域と車輪軌道をダッシュボード上に AR 提示するシステムを用いて, 道幅の狭い道路における搭乗者のストレス変化を調査する実験を実施した. その際, ストレス度の判定として, 生理指標である LF/HF と SC を用いた. AR 提示により, LH/HF の測定値が減少する傾向, つまり交感神経系の活動を軽減する傾向が見られた. SC に関しては, AR の有無に関わらず, 測定値の大きな増加が見られなかったことから, 実験中の搭乗者は, 刺激の強いストレスをほとんど感じなかったと考えられる. より強いストレスを与えるため, 自動車の走行速度を上げるなど, 実験環境を工夫する必要がある.

本研究の一部は JSPS 科研費 23300064 の助成を受けたものである.

文 献

- [1] “世界最先端 IT 国家創造宣言” (2013 年 6 月 14 日閣議決定), <http://www.itdashboard.go.jp/>
- [2] “トヨタ自動車、自動運転技術を利用した高度運転支援システムを 2010 年代半ばに導入”, http://www2.toyota.co.jp/jp/news/13/10/nt13_057.html
- [3] “Volvo Car Group’s first self-driving Autopilot cars test on public roads around Gothenburg”, <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/list>
- [4] “DARPA Grand Challenge”, <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/>
- [5] “Self-Driving Car Test”, <http://www.google.com/about/careers/lifeatgoogle/self-driving-car-test-steve-mahan.html>
- [6] “Navlab - Carnegie Mellon University”, <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/alv/www/>
- [7] 田谷 文宏, 北原 格, 亀田 能成, 大田 友一 “NaviView: 動的環境センシングによる運転者への視覚支援の取り組み”, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 予稿集 (SSI2005), pp.168-173, (2005)
- [8] Toru Miyamoto, Itaru Kitahara, Yoshinari Kameda and Yuichi Ohta, “Floating Virtual Mirrors: Visualization of the Scene Behind a Vehicle”, 15th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT2006), pp.302-313, (2006)
- [9] Kawamata “Lifted Road Map View on Windshield Display”, The IEEE Symposium on 3D User Interfaces 2013 (3DUI2013), pp.139-140, (2013)
- [10] Shota Sasai, Itaru Kitahara, Yoshinari Kameda, Yuichi Ohta, “AR Visualization of Wheel Trajectories of Driving Vehicle by Seeing Through Dashboard”, The 7th Korea-Japan Workshop on Mixed Reality (KJMR2014), (2014)
- [11] Takumi Yoshida, Kensei Jo, Kouta Minamizawa, Naoki Kawakami and Susumu Tachi, “A Display System for Vehicle Blind Spot Information Using Head Tracked Retro-reflective Projection Technology” The Journal of The Institute of Image Information and Television Engineers, vol.63, pp.801-809, 2009
- [12] 橋本 稜平, 野村 亮太, 神原 誠之, 浮田 宗伯, 池田 徹志, Yoichi Morales, 渡辺 敦志, 篠沢 一彦, 萩田 紀博, “生理指標に基づいた車椅子ロボットの挙動情報共有による搭乗者の快適性向上の検証” 電子情報通信学会クラウドネットワークロボット研究会 (CNR), CNR2014-14, p.27-32, 2014
- [13] Zhengyou Zhang, “A flexible new technique for camera calibration” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.22, pp.1330-1334, 2000
- [14] 日本自律神経学会, “自律神経機能検査 第 4 版” 文光堂, 2007.
- [15] 橋本稜平, 野村亮太, 神原誠之, 浮田宗伯, 池田 徹志, Yoichi Morales, 篠沢一彦, 萩田紀博, “車椅子ロボット搭乗者の心拍・発汗によるストレス推定結果と発生イベントの因果関係の検証,” 電子情報通信学会総合大会 学生ポスターセッション, ISS-SP-386, 2014.