

注視中の固視微動の分散と注意度についての基礎的検討

Basic study of miniature eye movement's dispersion and attention while gazing at visual target.

丸山 大岳[†] 齋藤 雄太[‡] 山田 光穂[‡]
 Hirotaka Maruyama Yuuta Saitou Mitsuho Yamada

1. あらまし

居眠り運転や漫然運転を防止するための運転中の覚醒度や注意度、自動運転からドライバーへ権限委譲する際のドライバーの内的状態の把握を目的として、運転中の心理・生理データの分析が行われている。我々は注意を向けると注視中の注視点、特に固視微動のマイクロサッカド成分が増加することに注目してドライビングシミュレーターを用いて実験を行っている。運転中に道路標識に気づきこれを注視することにより、標識前後の注視点に変化が生じるという仮説を立てて実験を行った。その結果、標識の通過前後で、注視中の眼球運動の標準偏差が増加することを示した[1]。ここでは、運転中の注意度を上げる試みとして、フレーム内で LED を点滅できる霧囲気メガネを用いて、同様の実験を行い標識通過前に霧囲気メガネを動作させ、注視中の眼球運動の標準偏差が霧囲気メガネによる事前警告により、いっそう増加することを示した。さらに、基礎的な心理実験を行い、注視中の眼球運動の標準偏差の増加が注意の増加と対応しているか確認した。霧囲気メガネの動作により、視標の発見率が増加し、応答時間も短縮し、同時に注視中の眼球運動の標準偏差も増加し、本研究の有効性を明らかにした。

2. まえがき

近年、Intelligent Transport Systems (ITS) 技術の実用化が進んでいる[2][3]。例として、自動運転技術・Advanced Driving Assistant System (ADAS) ・カーナビゲーションシステム等が挙げられる。交通事故統計 (平成 27 年 10 月末) のデータによると、漫然運転が内訳の中では最も高い構成率を見せている[4]。漫然運転の例として、ぼんやり運転が挙げられ、その背景には疲労や眠気による注意度低下が関係するとも言われている[5]。安全向上の観点からドライバーの注意度を上げる事や注意を評価するシステムが望まれている。

眼球運動の中には固視微動と言われる動きがあり、その詳細は章内 3 で記述するが、固視微動も人の心理状態を反映すると言われている。そこで、我々はドライバーの内的状態 (注意度や覚醒状態) を眼球運動の固視微動から把握することを目的とした実験を行い、注視中の眼球運動の分散を求めた。注視点には、一点を注視し続けるために必要な固視微動が含まれていると考えたからである。この結果を基に固視微動と注意に関する有効性を確かめた。

3. 本実験の位置づけ

これまで数多くの測定手法が提案されているが、いずれも 100%測定できるわけではない。信頼性を向上させるには、複数のパラメータによる総合的な検討が必要である。眼球運動について、瞬きやサッカドについての報告があるが、注視についてはない。注視しても対象から真剣に情報を取得するために注視しているとは必ずしも限らず、漫然と注視したり、単に一定期間目が動いていないだけの時もある。すなわち、注視の質について解明したいという要望が多いが、いまだ明確な回答はない。そこで、瞬きやサッカドに加え、眼球運動の重要な要素である注視時に生じる固視微動に焦点を当て、注意と注視中の固視微動の動きの大きさ、すなわち注視中の眼球運動の標準偏差から分析を行った。さらに、メガネの周囲に LED を点滅できる霧囲気メガネを用いて注意喚起の効果について検討した。

4. 固視微動

固視微動は、一点を注視中でも無意識に絶えず小さく動く不随意運動である。3種類の成分が含まれ、振幅角度が 15 秒程度で 30~100Hz の周波数成分からなる不規則運動 (Tremor) と、振幅角度 20 分程度で 30ms~5sec 間隔で不規則に生じるステップ状あるいはパルス状のマイクロサッカド (Micro-Saccade)、ドリフト (Drift) と呼ばれている偏位角度 5 分以下の遅い運動がある。その動きを図 1 に示す。Tremor は小さく非常に速い動きの成分であり視覚にはあまり寄与しないと考えられている。他方、マイクロサッカドとドリフトは主に注視中に注視位置が視対象からずれるのを防ぐために駆動されていると言われている。近年、マイクロサッカドは、人の心理状態に反映されると言われている。例として、人がある点を固視したままで周辺のある部分に注意を向けると、固視微動の方向が注意を向けた方向に偏る性質がある[6][7][8]。

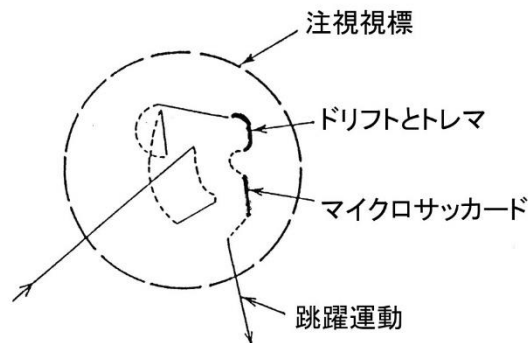


図 1 一点を注視しているときの動き

[†] 東海大学情報通信学部, 東京都

School of Information and Telecommunication Engineering,
 Tokai University, 2-3-23 Takanawa, Minato-ku, Tokyo,
 108-8619 Japan

[‡] E-mail: hirotaka_maruyama@star.tokai-u.jp

5. 仮説

固視微動の性質から注視の仮説を立てた。運転中に注意度が下がった時には、注視点の広がり小さく、注意を払っている時にはマイクロサッカド成分が増え、注視点が広がると仮定した。特に標識を見たり、雰囲気メガネ動作直後や運転操作した後の注視は、注意度が上がり、注視点が広がると仮定をした。

6. 実験装置

DS は UC-WIN/Road (株式会社フォーラムエイト) により開発した。4KDS 画像の生成には、ノートパソコン T954 (株式会社東芝) を用いて、4K 出力可能なプロジェクター VPL-VW500ES (ソニー株式会社) に HDMI ケーブルを介して表示した。眼球運動の測定には、ナックイメーজテクノロジー EMR-9[9] を用いた。被験者とスクリーンの距離 (視距離) を運転者によって快適な運転位置に調整するために 300~310cm とした。ステアリングやアクセル、ブレーキ等の運転操作として、Driving Force GT (株式会社ロジクール) を使用した。ドライバーの注意喚起用のウェアラブル端末として雰囲気メガネ[10] を使用した。雰囲気メガネは iPhone(Apple Inc.) の着信と連動して、メガネフレームに内蔵した LED の点滅や音の再生が可能である。図 2 には制作した DS 画面の一例を示す。スクリーンに表示した画像の大きさは横 280cm、縦 145cm である。スクリーンの輝度は、最小: 0.1cd/m²、最大: 57cd/m² であり、実験は室内照度 0.1Lux の暗室条件で行った。



図 2 制作した DS 画面例

7. DS 環境

7.1 道路設計

道路は、区間 6 つから成り立つ、全長約 100km である。標識は予測出来ないタイミングに出すため、全部で 12 個設置し、区間 4 番目以外に標識が出るように設置した。区間 4 に標識を設けなかったのは、単調な運転区間の挿入により、注意度の低下をもたらすことを期待したからである。標識種類は、時速 80km/h の速度制限標識、横風注意標識、動物注意標識の 3 種類を使用し、国土交通省が認めている一般道路や高速道路で使用している標識を使用した[11]。標識の中身は、図 3 の通りである。各区間の道路距離数と標識位置は、図 4 の通りである。図 4 の中で書いてある R はロード番号 (ロード区間番号) を示し、Ⓢ は速度制限標識、Ⓐ は動物注意標識、Ⓜ は横風注意標識で示す。また、図 4 に各イベント地点の略名 (K1, K2, K3, ...) を示す。(以降略名で記述)



80km/h 制限標識

* Ⓢ と表示



横風注意標識

* Ⓜ (風) と表示



動物注意標識

* Ⓐ (動物) と表示

図 3 使用した 3 種類の標識

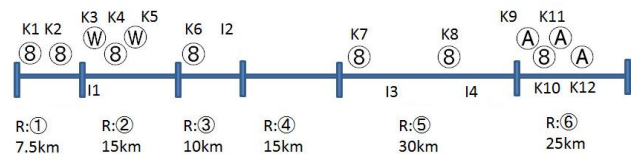


図 4 各区間の距離と標識の位置

7.1.1 シナリオ

シナリオは被験者の負担を考慮し、終点の約 100km まで運転するか、もしくは 60 分運転するか、どちらかの条件を満たす事で終了とした。また、被験者には、普段通りの運転をしてもらうように指示をした。

8. 実験: フレーム内で LED を点滅できる雰囲気メガネを用いた運転中の注意度変化の分析研究

8.1 実験方法

次に我々は標識通過前後で注視中の固視微動の標準偏差の増加することを示した文献 1 の結果を基に、運転中の注意度を上げる手法を試みた。ドライバーの意識状態を検出し、覚醒させる取り組みとしては、警告音、音声、フラッシュ光、運転席の振動など様々な方法が試みられている[12][13][14]。そこで、我々はメガネ内で LED を点滅できる雰囲気メガネ[10] の機能に注目し、その効果を注視中の眼球運動の広がりから検証を行った。雰囲気メガネは iPhone の着信と連動して、メガネフレームに内蔵した LED の点滅や音の再生が可能である。図 5 に雰囲気メガネ動作例を記載する。図 6 には実験中の様子を記載する。



図 5 動作中の霧囲気メガネ



図 6 実験中の様子

被験者は普通自動車免許取得済みの 18~22 歳の正常な視力を有する男女計:7 名で、被験者には普段通りの運転をしてもらうように指示をした。

条件 1 では霧囲気メガネを動作させたときとの比較のためドライバーに予測できないタイミングで道路標識を表示させ、道路標識前後の注視中の眼球運動の標準偏差を比較し、条件 2 では道路情報板通過約 13 秒前 (80km/h で 300m 手前) に霧囲気メガネの LED を点滅させた。図 7 に使用した標識と霧囲気メガネを動作させたイベントを示す。



図 7 使用した 4 種類の標識

霧囲気メガネの LED 点滅の効果のみを確かめるには、標識無しが望ましいが、標識を設定しないと標識前後の注視中の眼球運動の標準偏差を比較できない。そこで、視線移動が、より少ないと考えられ、霧囲気メガネによる注意喚起の効果には好適と考え、オーバーハング式標識板を用いた。図 8 に各イベント位置と各地点の略名を示し、霧囲気メガネを動作させたタイミングを ① で示す。(以降略名で記述)

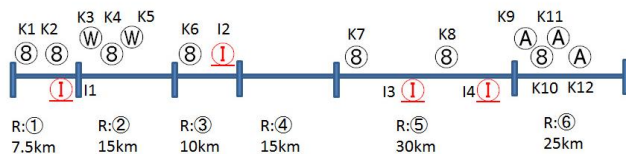


図 8 各区間の距離と標識の位置

8.2 実験結果と考察

文献 1 と同様に道路情報板前後の注視点を閾値 30deg/sec[15] より抽出し、その標準偏差を求めた.7 名中の 1 名分の例を図 9 に記載する。

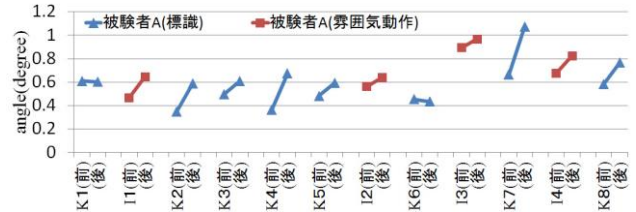
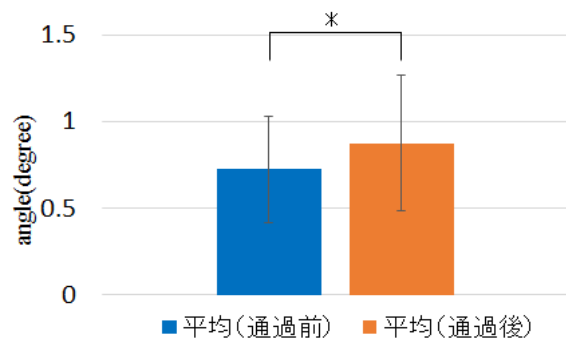
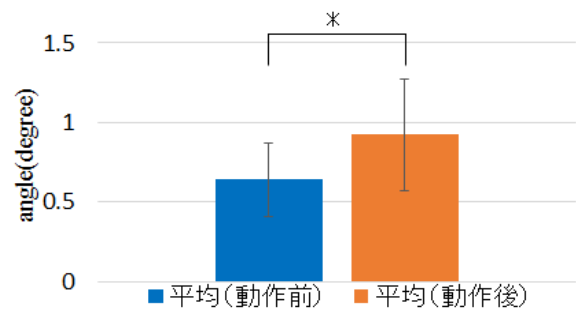


図 9 被験者 A の運転中の標識通過・霧囲気メガネ動作前後の注視点の標準偏差の変化



* $p=0.03 < 0.05$, データに対応がなく分散が等しい t 検定, $n=49$

図 10 全被験者の標識通過前後の標準偏差



* $p=0.0007 < 0.05$, データに対応がなく分散が等しい t 検定, $n=28$

図 11 全被験者の霧囲気メガネ動作前後の標準偏差

文献 1 と同様に条件 1 の標識前後の注視中の眼球運動の標準偏差の変化を比較し表 1 に、条件 2 の霧囲気メガネの動作前後の注視中の眼球運動の標準偏差の変化を比較し表 2 に示す。表 1 の縦軸が被験者、横軸が交通標識で示している。表 2 の縦軸が被験者、横軸が霧囲気メガネの動作を示している。K1~K5 の前半 (表 1) では、標識を通過する度に標準偏差が広がった。後半の K6, K7 では変化が小さくなるかわずかに減少する被験者がみられた。また、霧囲気メガネを動作させた場合 (表 2) は、全区間で動作後は標準偏差が広がる効果がある事が示された。条件 1 の場合、全被験者 49 例中 34 例 (全体で 69.8%) で標識通過後

に標準偏差が増加している。前半部分では、35 例中 28 例 (全体で 80.0%) で通過後に標準偏差が広がった。条件 2 の場合、全被験者 28 例中 27 例 (全体で 96.4%) で標識通過後に標準偏差が増加している。前半部分の I1 から I2 では、14 例中 13 例 (全体で 92.8%) で通過後に標準偏差が広がった。後半部分 (I3~I4) では、14 例中 14 例 (全体で 100%) で通過後に標準偏差が広がった。但し、前半の被験者 G の I1 を見れば分かるように減少と言っても-0.01 ときわめて小さい。

表 2 の霧囲気メガネ動作の中で一番効果があったのが、本研究の最後の場所、I4 の地点であった。実際に I4 の直前に通過した表 1 の K7 を見てみると、被験者 B・C・E・F は標準偏差が小さくなったが、表 2 の霧囲気メガネ動作では値がそれぞれ上昇し、標準偏差が大きくなる結果となり、注意度が上がった事が示唆された。図 10 に標識前後の t 検定、図 11 に霧囲気メガネ動作前後の t 検定を用いた解析を記す。標識部分では、 $p=0.03<0.05$ と、有意差がある結果となった。霧囲気メガネ動作前後でも、 $p=0.0007<0.05$ と有意差がある結果となった。

表 1 各被験者の標識前後の注視時の標準偏差の変化

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
A	-0.01	0.24	0.11	0.31	0.11	-0.02	0.18
B	0.07	0.15	0.19	0.12	0.12	0.11	-0.03
C	0.06	-0.43	0.70	1.31	0.43	-0.43	-0.09
D	0.65	0.51	0.17	-0.04	0.75	-0.05	0.40
E	0.08	0.20	0.11	0.14	0.10	0.27	-0.21
F	-0.02	0.01	0.10	0.01	0.07	0.20	-0.02
G	-0.15	-0.01	0.35	-0.08	0.02	-0.04	0.18

単位:angle (degree)

表 2 各被験者の標識前後の注視時の標準偏差の変化

	K1	K2	K3	K4
A	0.18	0.08	0.07	0.15
B	0.14	1.06	0.54	0.42
C	0.15	0.07	0.12	0.50
D	0.31	0.19	0.04	0.13
E	0.41	0.22	0.47	0.30
F	0.13	0.15	0.07	0.11
G	-0.01	0.12	0.10	0.07

単位:angle (degree)

実験の結果から t 検定を用いて比較すると、標識通過後は標準偏差が増加する傾向が見られた。霧囲気メガネでは 9 割の確率で標準偏差が増加し、仮説を踏まえて検討すると、注意度が上がった事が示唆された。検定した結果からも、統計的にも信頼性のある結果であった。各イベント通過前と後の注視時の広がりから、標識前の注意が落ちていると思われる状態では値が小さく、通過後は値が大きくなり、注意が増加する傾向が示唆された。また霧囲気メガネを用いた場合の方が、注意度を上げる効果が大きい傾向が見られた。これらの実験結果を受けて、運転状況でなく基礎的な心理実験により、注視中の眼球運動の標準偏差を注意度評価に使用する有効性について霧囲気メガネを用いて検証した。

9. 霧囲気メガネの効果について基礎実験を用いた検証

霧囲気メガネを用いた注視点の標準偏差と注意度の評価について基礎的な実験を行い、霧囲気メガネが注意度を上げるかどうか、有効性を検証した。霧囲気メガネの動作により、注視中の眼球運動の標準偏差に変化が生じ、同時に視標の発見率、応答時間に変化が出るかどうかを調べる。被験者には予め、90 度ずつ 4 方向に回転させた C のパターンを免許取得時に必要な視力 0.7 (1/0.7 分の大きさ) で真ん中に表示させた。表示領域は、中央を 0°、横 10°、縦 5° の円周上に 90 度ずつ 4 方向に回転させた C を 50ms 表示させ、発見率・正答率と提示前後の注視中の眼球運動の標準偏差を調べた。なお図 12 に実験で使用した画面例を示す。今回は表示 13 秒前に霧囲気メガネを点滅させるという事前通知ありの場合と霧囲気メガネの動作無しの場合をランダムに含めた全 10 イベント行った。実験環境や解析方法は、DS の時と同じように実施した。被験者は、普通自動車免許取得済みの 21~22 歳の正常な視力を有する男女計 4 名である。手順として被験者が周辺で C を発見したら、まずマウスクリックを一度行い、その後に中央に提示した C と同じ方向であれば、もう一度マウスクリックをして貰い、発見率・問題の正誤判断とした。また、その際にマウスクリックと C が表示された時間を比べ、応答時間も導き得るようにした。

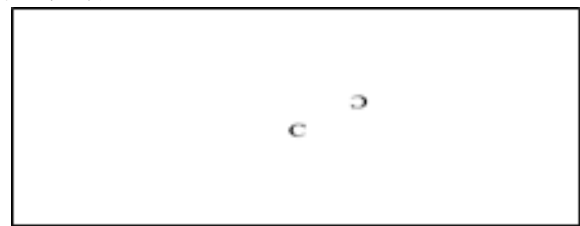


図 12 実験画面例

まず中央に C を表示し、次に周辺に C を表示

9.1 結果と考察

発見率と正答率を表 3 に記述する。視標を発見した時の応答時間を表 4 に記述する。実験 2 と同様に、視標提示前後 (DS で言う標識前後) の注視中の眼球運動の標準偏差の変化を比較し表 5 に、霧囲気メガネの動作前後の注視中の眼球運動の標準偏差の変化を比較し表 6 に示す。霧囲気メガネを動作させず、検査視標を提示したイベントをコントロールとして E1~E6、霧囲気メガネを動作させて、検査視標を提示したイベントを G1~G4 で示す。ただし、被験者 B の霧囲気メガネ 4 回目において、霧囲気メガネ本体とペアリングした端末との通信で問題が発生し、最後のみデータが取れていない。その為、今回は#NA と表示し、9 回分で解析を進めた。表 3 より正答率は、霧囲気メガネを用いた方が良い結果となった。また応答時間でも霧囲気メガネを用いた方が約 71.5ms 早いことが分かり、事前に予知または注意度の上げる状態を作ることによって、正答率、応答時間に変化をもたらした。t 検定を用いた結果として、発見率が $p=0.06>0.05$ 、正答率が $p=0.01<0.05$ 、霧囲気メガネ動作有り・無しの応答時間が $p=0.04<0.05$ 、発見率を除くそれぞれに有意差がある結果であった。標準偏差では、表 6 から分かる通り、霧囲気メガネを動作させた後の注視点は、標準偏差が増加し広がりを見せた。霧囲気メガネを

動作させていない 6 回に関しても、標準偏差が広がる結果となり、全区間 24 例中 17 箇所 (全体の 62.9%) で値が上昇した。図 13・14 に標識前後の標準偏差について t 検定を用いた解析を記す。霧囲気メガネの動作部分を除く視標提示前後では $p=0.004<0.05$ と、有意差がある結果となった。図 14 の霧囲気メガネの動作部分でも、 $p=0.0007<0.05$ と有意差がある結果となった。以上の結果から、視標提示前後及び霧囲気メガネを動作させた後は標準偏差が増加する傾向が見られた。特にその傾向は霧囲気メガネ動作で顕著であった。また、霧囲気メガネの動作により視標の発見率が増加し、応答時間も短縮し、霧囲気メガネにより注意度を向上させるという趣旨で行った実験 2 の結果の有効性を示すことが出来た。

表 3 各被験者の視標発見率と正答率

	発見率		正答率	
	霧囲気メガネ動作無し	霧囲気メガネ動作有り	霧囲気メガネ動作無し	霧囲気メガネ動作有り
A	88%	100%	60%	100%
B	88%	100%	75%	100%
C	90%	100%	75%	100%
D	100%	100%	50%	100%

表 4 各被験者の応答時間

	A	B	C	D	平均
霧囲気メガネ動作無し	1216	1137.6	812.6	1260.3	1118.6
霧囲気メガネ動作有り	1094	1052.3	746.2	1047	1047.1
差分	122	85.3	66.4	213.3	71.5

単位: ms

表 5 各被験者の指標提示前後の標準偏差の変化

	E1	E2	E3	E4	E5	E6
A	<u>-0.01</u>	0.20	0.67	0.22	0.45	0.33
B	<u>-0.12</u>	0.11	0.20	<u>-0.01</u>	0.96	0.83
C	0.19	0.18	<u>-0.24</u>	0.17	0.40	<u>-0.01</u>
D	<u>-0.02</u>	0.16	0.30	0.10	<u>-0.01</u>	00.05

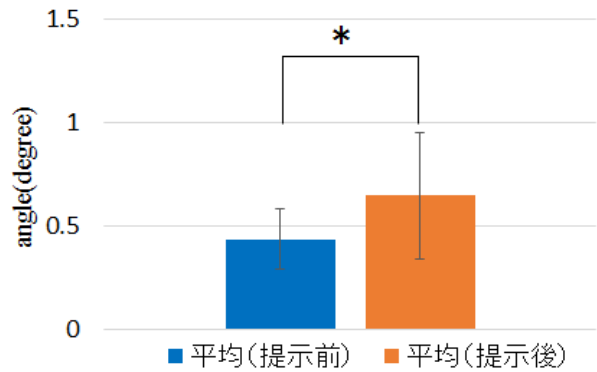
単位: angle (degree)

表 6 各被験者の霧囲気メガネ動作前後の標準偏差の変化

	G1	G2	G3	G4
A	0.09	0.09	0.38	0.13
B	0.15	0.27	1.12	#NA
C	0.45	0.91	0.86	0.30
D	0.04	0.19	0.24	0.21

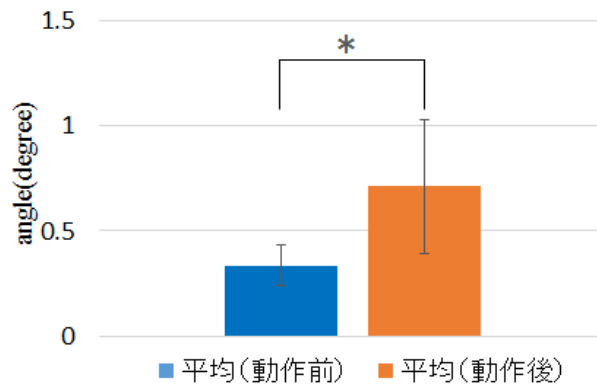
単位: angle (degree)

#NA: データが得られなかった部分



* $p=0.004<0.05$, データに対応がなく分散が等しい t 検定, $n=24$

図 13 全被験者の視標提示前後の標準偏差の変化



* $p=0.0007<0.05$, データに対応がなく分散が等しい t 検定, $n=14$

図 14 全被験者の霧囲気メガネ動作前後の標準偏差の変化

10. むすび

本研究は眼球運動の固視微動に注目を当て、注視中の眼球運動の標準偏差から注意度に関する評価を試みた。実験を通して、注意度が評価できる可能性が示唆された。4K 画像に DS 画面を表示させ、注視時の注視点の標準偏差の変化を解析した。実際に標識などの注意を向けた前後では、注視時の眼球運動中の標準偏差が変化し、運転中の集中度が評価出来る可能性を示唆している[1]。さらに注意度を上げる試みとして、メガネ内で LED を点滅できる霧囲気メガネに注目し、霧囲気メガネ点滅前後の眼球運動中の標準偏差を比較した。その結果、霧囲気メガネでは 9 割の確率で点滅後、注視点の標準偏差が増加することが示された。そして、注視中の眼球運動の標準偏差の増加によって注意度の変化を測定できる仮説と霧囲気メガネの動作で注意度が上がる仮説を検証する心理実験を実施した。ランダムなタイミングで、周辺視に提示したランドルト環の発見率と切れ目の方向の正答率及び、提示前後の注視中の眼球運動の標準偏差を霧囲気メガネの動作前後で比較した。その結果、霧囲気メガネによる事前通知により発見率と正答率が上がるとともに、応答時間が短縮し、注視中の眼球運動の標準偏差も広がる事が示され、注視中の眼球運動の標準偏差の

広がりによる注意度の測定, 雰囲気メガネによる注意度の向上が可能である事を確かめる事が出来た。

今後としては本研究をさらに根拠のある内容していきたいと考えており, 他の生体反応データ (脳内の血中酸素濃度・心電図・脈拍・皮膚電位・顔の表面温度) も取得し, 今回の注視点実験の結果を照らし合わせ, 注視中の眼球運動の標準偏差と集中度の関係性について, 詳しく調べていきたいと考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたり, 実験参加やデータ処理に御協力頂いた東海大学山田研究室の皆様にご感謝する。本研究はJSPS 科研費 16K01566 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 斎藤雄太, 飯塚岳, 山田光穂, 4K ドライブシミュレーターによる注視点解析, 信学研資, IMQ2015-8, pp.5-8, 2015
- [2] 自動車新聞, "ぐるぐる回る交差点," 産経デジタル, <http://cyclist.sanspo.com/149863>, 参照 Sep. 1, 2014.
- [3] 特定非営利活動法人 ITS Japan, ITS とは, "ITS Japan, <http://www.its-jp.org/about/>, 参照 Dec. 21, 2015.
- [4] 一般財団法人全日本交通安全協会, 交通事故件数, "全日本交通安全協会, <http://www.jtsa.or.jp/topics/T-254.htm>, 参照 Nov. 30, 2015.
- [5] 総務省統計局, 交通事故統計(平成 27 年度 10 月末), "警視庁交通局交通企画課, <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001140840>, 参照 Nov. 13, 2015.
- [6] 金子寛彦, "固視微動," 映像情報メディア学会誌, vol.63, no.11, pp.1538-1539, Nov. 2009.
- [7] Kohama T., Usui S., "Attentional effects on microsaccadic eye movements," "Current Psychol. Cogn., vol.21, pp.377-395, 2002. ISSN:0249-9185
- [8] Pastukhov A., Braun J., "Rare but precious: Micro-saccades are highly informative about attentional location," "Vision Res., vol.50, no.12, pp.1173-1184, Jun. 2010. DOI:10.1016/j.visres.2010.04.007
- [9] nac Image Technology, "NAC-EMR9 product, <http://eyemark.jp/product/emr9/index.html>, 参照 Dec. 21, 2015.
- [10] FUN'IKI Project, "Fun'iki Ambient Glasses," <http://fun-iki.com/>, 参照 Jul. 21, 2015
- [11] 国土交通省国土技術政策総合研究所, "道路標識, 区画線及び道路標示一覧," <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0848pdf/ks084812.pdf>, pp. 附 1-9, 参照 Oct. 1, 2015.
- [12] 柳平雅俊, 安土光男, "カーエレクトロニクス車載用香り発生器の効果の検討," Pioneer R&D, vol.19, no.1, pp.17-24, May. 2009.
- [13] 荒木学, 屋井鉄雄, 平田輝満, "バイオフィードバックによる居眠り運転防止方法の評価," 土木計画学研究・講演集, vol.30, pp.227, Nov. 2004.
- [14] 金子成彦, 藤田悦則, "ドライバーの覚醒低下警告・防止に向けた技術開発," 国際交通安全学会, vol.38, no.1, pp.57-63, May. 2013.
- [15] 松宮一道, 内川恵二, "網膜部位固定呈示法を用いたサックード時と追従眼球運動時の周辺視コントラスト感度の測定," 日本光学会, vol.33, no.2, pp.122-129, Oct. 2004.