高速道路における自動車運転時の眼球運動†

藤 森 充*・上 迫 宏 計**・川 村 幹 也**

Measurement of Eye Movement at Vehicle Driving on Expressway

Mitsuru FUJIMORI*, Hiroe UESEKO** and Mikiya KAWAMURA**

Nowadays, traffic accident in our country make rapid increase. The causes of an accident increase are vehicle increase and delay of a safe countermeasure. Attentiveness of a driver is important in order not to cause an accident. Therefore, it is important to investigate a visual performance at an automobile operation. A visual mentality of a driver at high-speed running becomes more unusual in comparison with a state of general road running. A purpose of this research is to analyze objectively visual phenomenon on high-speed running.

A eye movement of a driver on expressway running was measured by a record with eye-mark camera. A subject are ran with the next 3 kinds of a method. They are going straight with law speed, going straight with acceleration and lane change (passing). Considering a skill of a subject and safety the condition of an operation was set up. Therefore, a condition is comparatively simple. From an experimental result, an obvious difference was observed on a fixation point distribution pattern. By analyzing a measurement data, characteristics on each conditions were extracted. And, significance of fixation time was examined by a analysis of variance.

From an experimental result, we reviewed the relation between a fixation point and the narrowness of the visual field range. A result showed that 0.3 s fixation points had a significant characteristic. Further, a result suggested a correlation of a distribution of an eye-movement velocity with a fixation point. A conclusion that an eye-movement velocity changed by driving condition was obtained.

Key Words: vision phenomenon, eye movement, fixation, expressway

1. はじめに

近年、わが国の交通事故死件数は、先進諸外国が減少傾向にあるのに比べ、増加の一途をたどっている。これは道路環境が車両増加に追いつかない事や安全対策の遅れが原因であるが、一方運転者の注意力に対する要求も年々厳しくなるばかりである。一般に自動車運転については視覚情報が最も重要であり、運転に必要な情報の90%は視覚から得ていると考えられている。高速走行や、屈曲走行などでの緊張度は増すことが明らかになっている¹⁾。その結果、動体視力の低下、周辺視野の狭小がおこ

り、また種々の錯視現象が生じるといわれている。しかし、これらの視覚現象があるにもかかわらず、これまで視力や視野の測定は模擬的な適性検査装置で行われているにすぎず、必ずしも客観的な解析による実証がなされていない。

従来の研究では、高速道路の実際の走行時における各種の走行条件での運転者の視線の変化、すなわち眼球運動をアイマークカメラで記録測定し、そのパターンが上述の視覚心理現象とどのように関連づけられるかを解析し、事故防止策の一端となることを目的としている。これまで、ドライバーの運転教本に示された視線の動きについての妥当性を検討した報告²⁾があり、昼夜の条件を設定して視線の移動を比較している。また、運転条件を速度の高低、昼夜、先行車の有無などの条件を設定し眼球運動を測定した報告³⁾や被験者の運転習熟度をパラメータとしてテストコースにて運転操作を行ったときの眼球運動計測⁴⁾などが報告されている。

† 第 37 回自動制御連合講演会で発表(1994・11)

* 東京職業能力開発短期大学校 小平市小川西町 2-32-1

** 東洋大学工学部 川越市鯨井 2100

* Tokyo Polytechnic College, Kodaira

** Faculty of Engineering, Toyo University, Kawagoe
(Received January 17, 1996)

(Revised July 4, 1996)

本研究では、外部からの受動的な環境変化に対応した眼球運動の特徴に加え、運転操作といった能動的な要因による眼球運動の変化を知り、ドライバーの心理状態との関連を明らかにすることを旨とした基礎データの収集を行った。走行条件には定速直進、加速直進、車線変更(追い越し)の3種類を取り上げた。このほかにも複雑な種々の条件が考えられるが、今回は被験者の習熟度、および危険性を考慮した。その結果、3種の条件下で得られた固視点分布パターンの間には明らかな相違点がみられたので、パターンの各特性値である固視時間、固視頻度、固視回数、眼球運動速度などについて比較検討するとともに、運転者の視認性を左右する上記条件について分散分析により有意差検定を行ったので報告する。

2. 眼球運動

視力は、網膜上の中心部の狭い範囲で高く、周辺部では急激に低下するといわれている⁹⁾。そのため、眼球は絶えず運動し、視対象を網膜の中心に持つていこうとする働きがある。中心部でものを見ることは中心視と呼ぶ。また、周辺部でものを見ることは周辺視とよぶ。周辺視は中心視に比べ解像度は落ちるが、ものの動きに関しては敏感である。自動車運転では、普段は中心視により路面状況などの対象を認識しているが、周囲の状況の変化は、周辺視によりとらえ、眼球は見たい方向に運動する。

眼球運動は大きく補償性眼球運動、随意性眼球運動、微細眼球運動の3種類に分類できる。補償性眼球運動は身体や頭部の運動があったとき補償して、対象をとらえるための運動である。よって、非随意的な運動である。これに対して、見ようとする意志により生じる眼球運動は随意性運動と呼ぶ。微細眼球運動は眼球の動きを意図的に止めた場合でも生じる運動である。

本研究では自動車運転中の眼球運動を知ることが目的であるため、対象となる運動は随意性眼球運動である。随意性眼球運動には衝動性眼球運動、追跡性眼球運動などの種類がある。衝動性眼球運動はサッケードとも呼び、視対象を網膜上の中心に持つていくための急速眼球運動である。この運動は100°/s以上の速度で移動することもある。視対象がゆっくりと移動しているときに、それを追視するための眼球運動が追跡眼球運動である。

眼球の運動が停止することを固視と呼び、ある点を注視しているときに生じる。固視に要する時間は0.15~0.30 s程度である。実際の眼球運動は固視といくつかの種類の運動が組み合わされたものとなる。

3. 眼球運動の測定

眼球運動の測定には、角膜反射法を用いた。角膜反射

Fig. 1 Cornea reflection method

法とは、角膜表面に光を当て、その反射光を小型の CCD カメラで撮影する方法である。測定原理を Fig. 1 に示す。この方法は、ビデオシステムを用いているため、時間的分解能に制限がある。しかし、被験者の視対象が何であるかを同時に撮影するビデオ画像により直接調べることができる。測定中の周囲の光量に依存しない、水平垂直方向に対して同様の精度が保証できるなどの長所がある⁷⁾。また、光源や CCD カメラは一体化しており装着は比較的容易である。

眼球運動の測定結果からは、固視の時間と位置、運動の速度を得る。固視の時間は被験者の注視の状態を知る手がかりになる。また、固視の位置により注視点を明らかにすることができる。眼球運動の速度やその振幅からは、被験者の視野の広がりに関する検討ができる。自動車運転を考えると、運転の条件が変化すれば被験者が必要とする情報も異なり、眼球運動の様相が特徴的になる。したがって、逆に被験者の運転中の眼球運動を測定することで、運転条件による視覚の特徴差を知る手がかりになる。

3.1 測定条件

一般道路での運転行動を考えると、環境情報が多く、左右の安全確認が多くなる。また、ハンドル操作や速度調整を頻繁に繰り返す必要があるため、速度計などの表示部を確認することも必要になり、視線は複雑な経路をたどる。今回は、基礎的データを得ることを目的としたために、測定場所は環境情報が少なく、交通状況が急激に変化せず、操作が最も少ない状態で運転できる高速道路とした。高速道路では歩行者、信号機、対向車など一般道路に比べて考慮しなくてよい対象があるため身体の大きな動きはないという特徴がある。高速道路と一般道路との視対象の比較を Table 1 に示す。路面やミラー、標識などはいずれの場合も視対象となるが、一般に高速道路上では信号機、歩行者、対向車を見ることはない。設定した条件は一定速度で走行する定速直進、直進している状態で加速する加速直進、一定速度で通行帯を変更する車線変更(追い越し)である。運転操作の中でもできるだけ単純な操作で可能な条件を設定した。運転の条件を Table 2 に示す。つまり、定速直進は大きな操作を必要と

動く速さに関係する。実際のものの見え方はものが動く速度そのものでなく、見る距離と速度の両者から定まる角速度に直接関係する⁹⁾。眼球運動の速さを中心視について考えると、眼球運動と視線の動きは等価に考えることができるので、1秒あたり眼球が何度回転したかという角速度で表現できる。そこで、眼球の運動する速さは眼球運動角速度で表現した。

眼球運動角速度からは、運動の方向と速さを知ることができる。移動ベクトルの方向を垂直方向と水平方向に分類することで運動の特徴を示すことができる。水平方向と垂直方向との分類では、 $\pm 45^\circ$ 以内の移動ベクトルは水平方向に移動していると分類した。水平方向の移動ベクトルの度数 B が全体の移動ベクトルの度数 A に対してどの程度の割合かを示す値として、Horizontal Ratio = $B/A \times 100[\%]$ を条件ごとに求めた。

振幅 15° 以下のサッケードにおいては、振幅が大きいほど速く運動する傾向があるといわれている⁹⁾。つまり、サッケードに要する時間は振幅に関わらず大きく変化しないということである。したがって、運動角速度のデータから得られる特徴は、振幅の前後に固視点が存在することを考えれば、固視点の分布の広がりを見る指標とできる。

眼球運動角速度は大きさについて、被験者、運転条件ごとに平均を求めた¹⁰⁾。被験者間と運転条件間での差について検定を行うため、二元配置の分散分析¹¹⁾を行った。母平均を μ 、被験者による主効果を α 、運転条件による主効果を β 、誤差を ε として、

$$x_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

なる i 行 j 列の 2 元配置モデルを考えた。主効果 α, β については、

$$\Sigma \alpha = 0, \Sigma \beta = 0 \quad (2)$$

を満たし、誤差項 ε については正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従うものと仮定した。

Fig. 4 Locus of fixation point

4. 実験結果

4.1 固視時間

固視点の軌跡を Fig. 4 に示す。測定は 5 名の被験者で行ったが、1 名の被験者の軌跡を例として示した。運転条件の相違により、軌跡の範囲、固視の点数などが異なる。軌跡の範囲を示すために、固視点の水平方向と垂直方向のデータから標準偏差を求めた図が Fig. 5 である。これより、加速直進の場合は、いずれの被験者の場合も領域が狭くなっていることを示している。被験者 B の車線変更の垂直方向のばらつきが大きくなっている。VTR から実際の認識点を調べると、測定データの最終の点数において、速度計を認識した固視点が認められた。この点の移動量は大きいため領域を示す Fig. 5 では大きな変化となっているが、データ数としては全データの 5% に満たないことから、後述の固視点や固視時間、眼球運動に関する集計には影響しない。固視が 1s あたり、何点あるかを求めた結果を Table 3 に示す。加速直進は固視の回数が 3.04 回/s と、その他の条件の 7 割程度の大きさを示している。固視時間と運動時間の関係は、Fig. 6 に示すように固視時間が約 80% である。また、運転条件別に比較すると、加速直進の場合は固視時間が他の条件に比べて長いといえる。

固視時間頻度と平均固視回数を Fig. 7 に示す。被験者のデータを条件ごとに総合したものである。加速直進の特徴は 0.08 s から 0.16 s の固視時間頻度はほかに比べ

Fig. 5 Comparison of fixation area

Table 3 Fixation number of times per second

Driver	Fixation number [times/s]		
	Constant-speed	Acceleration	Lane-change
A	5.8	5.4	5.4
B	4.4	3.2	3.9
C	2.8	3.0	4.9
D	4.0	1.6	3.6
E	4.1	2.0	3.3
Mean	4.2	3.0	4.2
SD	1.07	1.48	0.89

Fig. 6 Fixation time per movement time ratio

Fig. 7 Fixation frequency and average number of fixation

て小さいものの0.28 sから0.32 sの固視時間頻度は大きくなっている。このことから、加速直進の条件下では他の条件に比べて固視時間の長い割合が多いことが示された。平均固視回数は、いずれの条件の場合も固視時間が短い場合は大きい。また、0.3 s付近の回数が増えていることが確認できる。

4.2 運動角速度

まず、運動角速度が運動方向とどのような関係にあるかを調べた。角度が0°は被験者が車両の進行方向を向い水平右方向である。水平左方向は180°, 90°は垂直上方向を示す。運動方向を45°と135°方向で分割し、水平方向と垂直方向の度数割合を調べた結果をTable 4に示す。全条件の水平方向の度数割合を平均すると77.4%であった。標準偏差が9.2%であることから、水平方向の移動はいずれの条件下でも垂直方向に比べて移動範囲が広がる傾向がある。

運動角速度の平均を条件および被験者ごとに調べ、これをもとに、分散分析を行いAOV表を求めた結果がTable 5である。被験者間による平均値の一様性は危険率5%水準で否定できないことが示されるが、運転条件

Table 4 Ratio of horizontal to total eye movement frequency

Driver	Horizontal ratio [%]		
	Constant-speed	Acceleration	Lane-change
A	68	65	72
B	79	89	86
C	83	69	87
D	61	91	84
E	75	78	74
Mean	73.2	78.4	80.6
SD	8.79	11.6	7.06

Threshold angle = $45 + 90n$ [°] ($n=0, 1, 2, 3$)

Table 5 AOV of eye movement velocity

SV	SS	DF	MS	F_0	$F_{0.05}$
Driver	1522	4	388	2.56	3.84
Drive condition	2070	2	1035	6.87*	4.46
Error	1206	8	151		
Non additivity	10.7	1	10.7	0.06	5.59
Remain	1195	7	171		

Fig. 8 Relationship between drive condition and eye movement velocity

による平均値の差は観測 F 値が $F_0=6.87$ に対して $F_{0.05}=4.46$ と $F_0 > F_{0.05}$ が成立するので有意であるといえる。そこで、母平均の推定点と 95% 信頼区間を求めた。加速直進の運動角速度が最も小さく、ついで定速直進、車線変更の順であった。各被験者の運転条件と眼球運動角速度の関係を Fig. 8 に示す。2 元配置のモデル式で、 $\gamma\alpha_i\beta_j$ の項を含め、被験者と運転条件の間の加法的について Tukey の検定¹²⁾を行った。

$$x_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma\alpha_i\beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

Table 5 に示す通り、 $F_0=0.06$ 、 $F_{0.05}=5.59$ となり、 $F_0 < F_{0.05}$ という結論が得られたため、 $\gamma=0$ の仮説を捨てるだけの変動が認められなかった。 $\gamma=0$ の仮説が棄却された場合、つまり $F_0 > F_{0.05}$ の場合には 95% の確率で $\alpha_i\beta_j$ の項が残るため加法的が成立しなくなる。この場合、 $\alpha\beta$ 間には何らかの交互作用があると考えられる。つまり、解析結果は、 $\gamma=0$ の仮説を採択する時の危険率は 5% であることを示している。よって、 $\alpha_i\beta_j$ の項はなくなり、加法的が成立、交互作用はないという結論に達した。

5. 運転条件との関連

平均固視回数を示した Fig. 7 によれば、いずれの条件でも、0.3 s 付近の固視が認められ、1.1 回から 1.2 回程度を示している。固視時間頻度が高ければ、固視点の絶対的な回数が多いので、同ブロックへの固視回数が増えるということがいえる。固視点がランダムな場所に発生しているとすれば、固視時間頻度が小さくなると同ブロックへの固視回数も減少するはずである。しかし、0.3 s 付近では平均固視回数が増加することが示されたことから、この固視点の視認における重要性を示唆するものと考えられる。そこで、0.3 s 前後の固視点を抽出して描くと Fig. 9 のようになる。この点が中央付近であることから、前方正面を認識するための固視であることがいえ、運転中の視覚情報として正面方向は重要な点であるという運転者の経験とも一致する。また、一般の視認につい

Fig. 9 Distribution of fixation point

ても、0.3 s 前後の固視が必要であるとする指摘¹³⁾とも関連するものと考えられる。運転中のドライバーの情報処理速度を求めた報告⁹⁾では、運転者の積極的な操作を行わない運転操作中においては、0.4 s 程度の固視時間を持つ固視点での認識を重要な認識点ととらえている。ドライバーの操作を加えた今回の測定では、固視時間 0.3 s 付近の固視点が重要な認識点とよく一致する結論を得たことから、この固視点についても情報の取得に関与していると見ることができる。平均固視回数のグラフを詳しく見ると、0.28 s 付近で平均固視回数が増加しているのがわかる。また、Fig. 9 を Fig. 3 と比較すれば、0.3 s の固視時間を持つ点の分布と繰り返し固視している点の分布は似通った領域を示していることから、この領域の重要性が示されている。

運転条件別に固視時間を比較すると、加速直進は固視時間が長いことが示された。また、固視点の分布をみると加速直進はその領域が狭い。これらの結果は、加速直進の場合は遠方を注視する必要から、眼球をあまり動かさないことを示唆している。

運動角速度の解析から、運転条件により速度が異なることが示された。結果によれば、車線変更条件下での速度が最も高速となっている。これは、多くの地点の情報を俊敏にとらえるための運動ということができる。車線変更時はドライバーは細心の注意で路面と車両の進行方向に注意を払うが、このような運転中のドライバーの意識を裏付ける結果と考える。加速直進の場合には、運動角速度は他の条件に比べて平均値で 30°/s 程度小さい。これは視覚領域の減少と関連がある。一般に、眼球運動の振幅と速度とは比例関係を示すといわれている⁹⁾。したがって、速度の減少は視覚領域の減少と等価に考えることができ、眼球運動の特徴を知るための重要なパラメータといえる。通常の眼球運動を調べた報告¹⁴⁾では、眼球運動角速度が高速の場合には、振幅が大きくなることを示している。今回の測定結果においては、加速直進が 3 条件の中で最も速度が小さく、かつ固視点の領域も

小さいことが確認できた。したがって、自動車運転中においてもこの傾向になることが示された。このようなことから、眼球運動角速度を調べることは、固視点の広がりやを評価する簡易な方法として提案できる。

運動の方向は、水平方向が多くなっており、運動角速度が大きいという特徴がある。これは、フロントガラスからの視界が水平方向に広いことと、水平方向に広い視野を持つ眼の構造によるものである。また、高速走行時にはある程度遠方を注視している方が安全で、視線を下方に下げ近距離を注視すると危険であるという運転者の心理も関連しているものと考えられる。

分散分析の結果からは、被験者間の一様性は否定できなかった。これは、今回の実験で依頼した被験者の運転経験と年齢、性別などがほぼ同一であったためである。今回の被験者設定は運転条件間の差を検証するためには適当であった。しかし、一般の交通社会の中では運転経験や年齢の差は存在するため、さらに多くの事例研究も必要である。

6. おわりに

高速道路を走行中のドライバーがどのような眼球運動をしているについて測定および検討を行った。眼球運動の測定結果から、大きく2つの量を得た。1つは固視の時間であり、もう一つは固視点から固視点への運動角速度である。測定データを検討することにより次の5つの特徴を明らかにした。

- ・加速直進の視覚領域は他の条件に比べて狭くなっている。加速直進は眼球をあまり動かしていない。高速走行時の特徴として視野狭窄が知られているが、これは眼球運動の範囲が狭くなることに関連していることを示した。視対象が道路上の構造物であれば、定速直進と同様の範囲に眼球が運動した場合、眼球が高速に運動すれば追従できる角速度である。しかし、この場合の眼球運動角速度は小さくなることから、眼球運動範囲が狭くなり視野狭窄が起こると考えられる。

- ・繰り返し固視を行う領域と、0.3s前後の固視を行う領域とから重要な固視点が推定できる。固視時間頻度と平均固視回数との関連から、繰り返し固視を行う重要な固視点が推定できる。

- ・水平方向への移動ベクトルの個数が垂直方向に比べて1.5倍程度多い。

- ・運転条件により、眼球運動の角速度に変化がある。加速直進の眼球運動は運動角速度が小さい。

- ・運動角速度は固視点分布領域の指標になる。

今後は、さらに被験者の数を増して運転行動と眼球運動との関連について検討を行う考えである。また、眼球

運動以外の各部の身体の運動についても検討することにより、運転中の運転者の心理的な要因も含めて検討することができると考えている。本研究を直接的に事故防止策に関連づけるためには、基礎データをもとに次の点を考慮した測定や解析の方法を検討することが必要と考えている。

適切な判断に必要なドライバーの視覚情報とこれを得るための眼球運動に関する特徴を検討することで、不足した情報の検討が可能となる。よって、安全運転に必要な情報を視覚以外から提供し、自動車側からの安全対策とすることができる。また、眼球運動には非随意的な運動も含まれるため、ドライバーの心理状態をとらえる情報源と見ることができる。これよりドライバーの運転適性や不安全行動との関連を調べることでドライバー側からの事故防止対策を検討できる。眼球運動以外にも身体運動を検出し同様の目的に利用できないか検討を進めていきたい。

最後に、本研究の一部は東洋大学特別研究費の援助によるものであることを付記する。

参考文献

- 1) 神谷, 濱谷, 磯村: 運転者の緊張度分析, 自動車技術会論文集, 24-2, 113/118 (1993)
- 2) HT Zwahlen: Eye Scanning Rules for Drivers. How Do They Compare with Actual Observed Eye Scanning Behavior?, Transportation Research Record, 1403, 14/22 (1993)
- 3) 萩原, 野内, 加来: 走行条件と運転者の見方について, 自動車技術会論文集, 23-4, 107/111 (1992)
- 4) 増田, 永田, 栗山, 佐藤: 運転初心者の方常円旋回中の視覚及び運転行動, 自動車技術会論文集, 23-3, 92/96 (1992)
- 5) 水野有武: 光・眼・視覚, 47/55, 産業図書 (1994)
- 6) 本田仁視: 眼球運動と空間定位, 1/35, 風間書房 (1995)
- 7) 沖野, 島村: 生体計測入門, 81/97, コロナ社 (1981)
- 8) 藤森, 上迫, 田中, 川村: 高速道路走行における眼球運動の測定, 第36回自動制御連合講演会前刷, 373/374 (1993)
- 9) 照明学会: 最新やさしい明視論, 36/54, 照明学会 (1979)
- 10) 藤森, 上迫, 田中, 川村: 高速道路における自動車運転時の眼球運動, 第37回自動制御連合講演会前刷, 467/468 (1994)
- 11) 中村慶一: コンピュータによる統計解析, 28/52, 森北出版 (1977)
- 12) 奥野, 久米, 芳賀, 吉澤: 多変量解析法, 246/248, 日科技連 (1981)
- 13) 池田光男: 眼はなにを見ているか, 29/50, 平凡社 (1988)
- 14) A. T. Bahill, A. Brockenbrough and B. T. Troost: Variability and Development of a Normative Data Base for Saccadic Eye Movements., Investigative Ophthalmology and Visual Science, 21, 116/125 (1981)

[著者紹介]

藤 森 充 (正会員)

1989 年, 東洋大学大学院工学研究科電気工学専攻, 博士前期課程修了。同年雇用促進事業団に入団, 港湾職業訓練短期大学校に勤務。93 年東京職業能力開発短期大学校講師, 応用電子計測に関する研究に従事。

上 迫 宏 計 (正会員)

1963 年, 日本大学理工学部電気工学科卒業, 同年東洋大学工学部電気工学科に勤務。現在同大学工学部電気電子工学科助教授。電解質溶液の測定法, 画像計測, オペアンプの雑音除去法などの研究に従事。電気学会, 日本人間工学会, IEEE などの会員(工学博士)。

川 村 幹 也

1944 年, 東京工業大学電気工学科卒業。61 年東洋大学工学部電気工学科助教授, 74 年同教授, 91 年同名誉教授。電気学会, 電子情報通信学会などの会員(工学博士)。