

運転者の注視点とその評価に関する研究

MEASUREMENT AND EVALUATION OF DRIVER'S EYE-MOVEMENT

萩原・亨, 加来・照俊

By Toru HAGIWARA and Terutoshi KAKU

A method of evaluation of driver's eye-movement behavior which is measured by a vision analyzer are studied. The result of this study is summarized briefly to the followings.

- (1) A vision analyzer, which has a powerful data processing system, is used to record driver's eye-movement. Driver's eye-movement patterns in driving is displayed in the three dimensions space.
- (2) Fixation duration, fixation distances and frequency distribution of fixation points in driving are estimated from the result of measurement of eye-movement.
- (3) A entropy that is the expectation of an amount of information is used to evaluate driver's eye-movement behavior.

1. はじめに

注視点測定装置を用いて運転者が注視する対象物の解析及び運転者の注視行動の評価について研究を行った。本研究の目的と内容を以下に示す。

1) 運転者の注視点を測定し、その位置を道路の3次元空間内に表示する。運転者の注視位置、注視時間、注視距離の解析を行う。運転者の眼球運動の測定は、[Vision Analyzer]により行う。

2) 運転者の注視行動の定量化と評価。運転者の注視行動は道路環境を情報源とする情報の収集であると考え、情報量の期待値であるエントロピーを指標として、注視行動の評価を行う。

運転者の注視行動の研究として、アイカメラを用

* 正会員 工修 北海道大学助手 工学部土木工学科
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

**正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

いた分析手法によるものが従来から行われてきた。

海外では、Mourant & Rockwellらが、視野における注視時間の分布、注視対象物と注視時間の関係等の基礎的な研究を行い、さらに初心者と経験者の視覚情報摂取パタンの比較を行った¹⁾²⁾。Kaluger & Smithは、長距離運転と睡眠奪取条件において³⁾、Cohenは、道路上の予期しない障害物の近傍を通過する時の眼球運動を記録し解析を行った⁴⁾。また、Shinarらは、カーブにおける運転時の視覚情報摂取過程について研究を行った⁵⁾。

国内では、村田らが運転者の注視点分布、注視時間分布、注視対象までの距離について分析を行い、注意の集中の度合と眼球運動の関係を示す指標として凝視度を定義した⁷⁾⁸⁾。また、長山らは、二輪車運転時と四輪車運転時の眼球運動の比較を行い、その視覚探索パタンの違いを示した⁹⁾。

このように、注視点の分析により、運転者の視覚による情報摂取パタンの把握が示された。しかし、

注視点の解析法やデータ処理法における2次元的な扱い、及び測定データ量において必ずしも十分とはいえない。近年の計測技術と計算機の急速な発達に伴い、従来とは比較にならないほど高性能な眼球運動測定器機が開発されている。運転者の注視行動は、道路環境の整備、運転者教育、自動車の安全性などにとって重要な評価指標である。注視行動の測定・評価手法の新たな開発は、より安全で快適な道路交通の確立にとって必要であると思われる。

2. 運転者の注視点の測定

運転者の眼球運動を測定し、その結果から道路の3次元空間内に注視点を出力するまでの簡単なフローを図-1に示す。運転者と指標平面の位置関係を測定し、指標平面上の注視位置と運転者の眼を結ぶ直線を拡大する。この視線と道路空間が交差する点を注視点とした。

(1) 運転者の眼球運動の測定

〔Vision Analyzer〕は、NHKの技術研究所で開発された強力なデータ処理機能を持つ眼球運動測定装置である。著者らは、NHKと共同で運転者の注視点の測定に応用するシステムの開発を行った¹⁰⁾。この眼球運動測定装置の特徴として、

a) 眼球運動をリアルタイムで計算機処理し、注視点の軌跡の形で被験者が観察している画像と重ね合わせうる。また、測定結果は計算機のメモリに記録され、長時間にわたる大量のデータを扱うことが可能である(10Hzのサンプリングで、約1時間)。さらに、注視点分布・速度分布・運動ベクトル分布などの計算処理と出力が即時に行える。

b) 運転者に装着される眼球運動検出部は、眼鏡用のフレームの下部に検出用素子を取り付けたものであり、運転者の視野への影響は少ない。このため、測定条件が受ける拘束は少ない。

(2) 運転者の頭部の運動

運転者の頭部は、走行時において主にY軸回りの回転(ピッチ)とZ軸回りの回転(ヨー)を行う。頭部の運動の測定は、大坪ら¹¹⁾等によりなされており、幾通りかの測定手法が考案されている。ここでは、頭部に取り付けた小型カメラの映像と車両に取り付けた指標の相対運動から測定した。

試験車の前方に指標を2点設定し、その指標の動

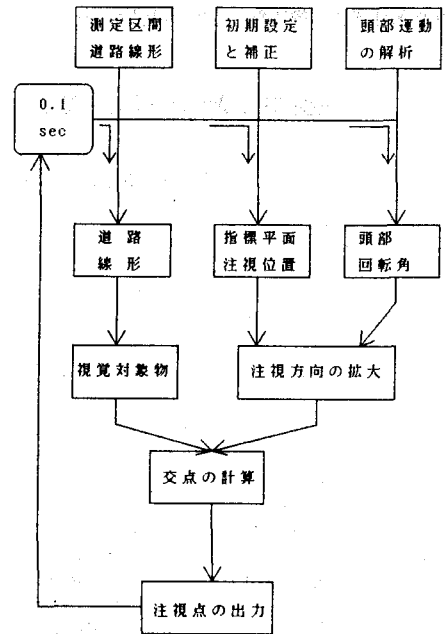


図-1 注視点解析の手順

きを小型カメラにより撮影する。映像を再生し、初期設定状態と必要な区間の指標の座標値を映像から1Hzでサンプリングし、頭部の回転角(Y軸回り、Z軸回り)を求める。よって、運転者の視線の方向は、指標平面上の注視位置の方向に頭部の回転角を加えたものとなる。

(3) 道路構造

注視点解析対象区間(曲線区間)を図-3に示す。札幌自動車道の小樽方向車線の一部(約1.5km)である。道路線形の入力、平面線形のみを行った。直線区間は、これより札幌側の約1kmの区間である。

運転者が注視する対象物として、ルームミラー、左右のフェンダーミラー、路面、及び道路空間に設定した左側面、右側面、上面、及び100m前方である。図-2にこれらの注視対象物を示す。

(4) 車両の位置

車両の走行位置は、注視点の測定と同時に記録している速度センサからの出力データを用いて計算される。なお、これら二つの区間における試験車の速度は、各被験者75-80km/hであった。

車両のハンドル角と加速度を測定することにより、横断方向の位置を求めることは可能である。横断方向の位置を測定することにより、追越し時及び車線

変更時の運転者の注視点の解析が可能となる。

(5) 3次元による道路空間の表示

道路空間全体を3次元空間に表現するシステムを開発し、運転者の注視点と道路線形を合成した画像の表示を行った。運転者の注視点の動きと車両の動きの合成運動が、システム内において実現されている。注視点の位置とその移動パターンの傾向の把握を容易にするため、観察者の視点を空間内に自由に設定できるよう設計されている。

3. 運転者の注視点の解析

図-1のフローに従って運転者の注視点を解析した結果を示す。0.1sec間隔で注視点の測定と車両の位置の計算を行った。解析区間は、曲線区間と直線区間で、被験者は4名である。4名の走行条件は、ほぼ同じである。被験者Aの曲線区間での注視点の位置と道路線形の関係を図-3に示す。

(1) 注視位置の表示と視覚探索ボタン

図-4は、被験者Aが曲線区間を走行したときの注視点の位置を3つの視点から観察したものである。

a) 観察点A 観察点Aは、走行車両の真上10mから運転者の注視点を透視する視点である。100m区間全体を図に示しているため、手前の試験車は極めて小さく表示されている。中央線は10mごとの破線となっており、注視点の距離をラフに読み取れる。

b) 観察点B 観察点Bは、車両内の運転者の1m後方から観察したときの注視点である。中央上が

ルームミラーであり、左右の四角い枠はフェンダーミラーの一部である。両サイドのフェンダーミラーから下に位置する中央の一群の視点は、メーター類を被験者が見ていることを示している。この観測点からは、運転者のミラーの使い方がよくわかる。

c) 観察点C 観察点Cは、車両の左20mから運転者の注視点を観察した視点である。注視点と道路空間の上下方向との関係を明らかにするための観測点である。運転者の眼の位置より高い地点を見る

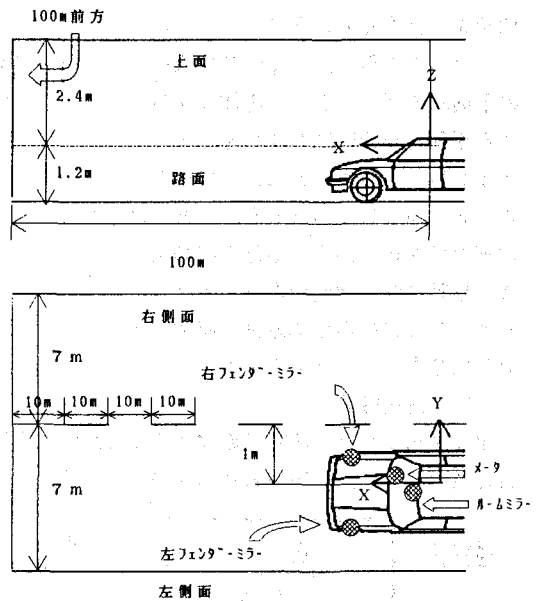


図-2 道路空間と注視対象物

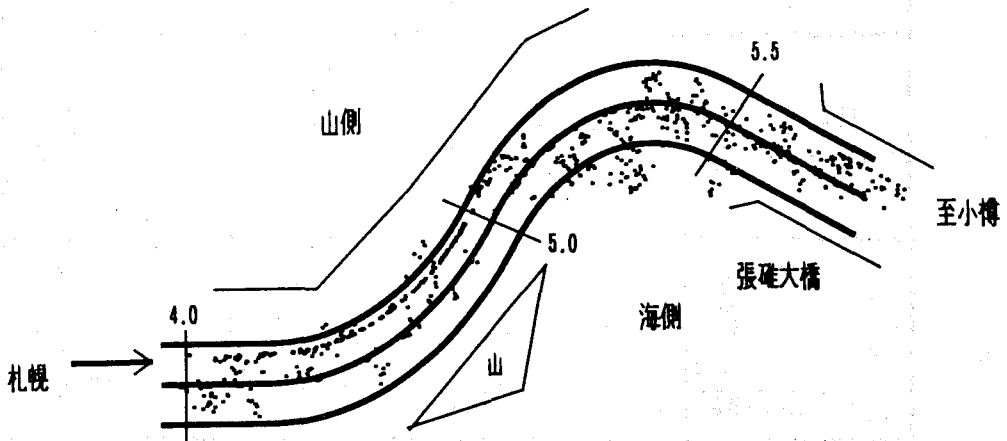


図-3 曲線区間における注視点位置分布と道路線形(被験者A)

ケースは、ルームミラーを除いてこの区間内において少なかった。市街地の走行においては、信号の注視頻度が高く、上方向を見る場合が多いのとは対称的であった。

図-3,4から曲線区間における運転者の注視点による視覚探索パターンを考察するならば、カーブに進入する直前の区間において前方のカーブに関する情報を探るため遠くと近くを交互に注視する。一方、カーブ区間では、先に得た情報を修正しながら車両を安定して走行させるために比較的近距离のカーブ外側線を注視するといえる。

これらの結果は、「運転者は次の運転行動のための予期的先行プログラムを作成する」としたCohenによる運転行動の時間的流れをとらえた結果⁴⁾を説明するものであろう。また、「カーブに入る直前及びカーブを通過しているとき、運転者は車両のすぐ前の道路外側線と前方の道路の端の間をあちこちと注視を移動させる傾向がある。」としたShinarらによるカーブにおける眼球運動の研究が得た結果⁵⁾と類似した結果であるといえよう。

(2) 注視時間

曲線区間における注視対象物別の注視時間の平均値を図-5に示す。各被験者とも注視時間の平均値は

約0.4secであった。フェンダーミラーの注視時間は被験者により差が見られる。フェンダーミラーを注視する場合の時間が他の注視対象物を注視する時間より長い被験者A、Bと逆に車両の前方時の注視時間が長い被験者C、Dに分かれた。また、メータの注視時間はいずれの被験者も0.4secを越えており、他の視覚対象物に比較してメータの数値を認識するために多少の時間が必要な傾向を示した。

これらの注視対象物別の注視時間は、過去においてアイカメラ法を用いて報告された結果²⁾⁷⁾⁸⁾と比較してみると非常に類似しており、データの信頼性が確かめられた。

曲線区間と直線区間の平均注視時間の比較を図-6に示した。4名の被験者とも曲線区間の注視時間のほうが直線区間の注視時間より約10%短くなった。直線区間ではゆっくり見ても余裕があるが、曲線区間においては多くの対象物を短時間に見る必要があり、一つの事象をゆっくり見ていたのでは時間が不足してしまうからであろう。

(3) 注視距離

曲線区間における各50m区間の平均注視距離を図-7に示す。注視対象物のミラー類とメータは平均注視距離の計算から除いた。区間別の平均注視距離を

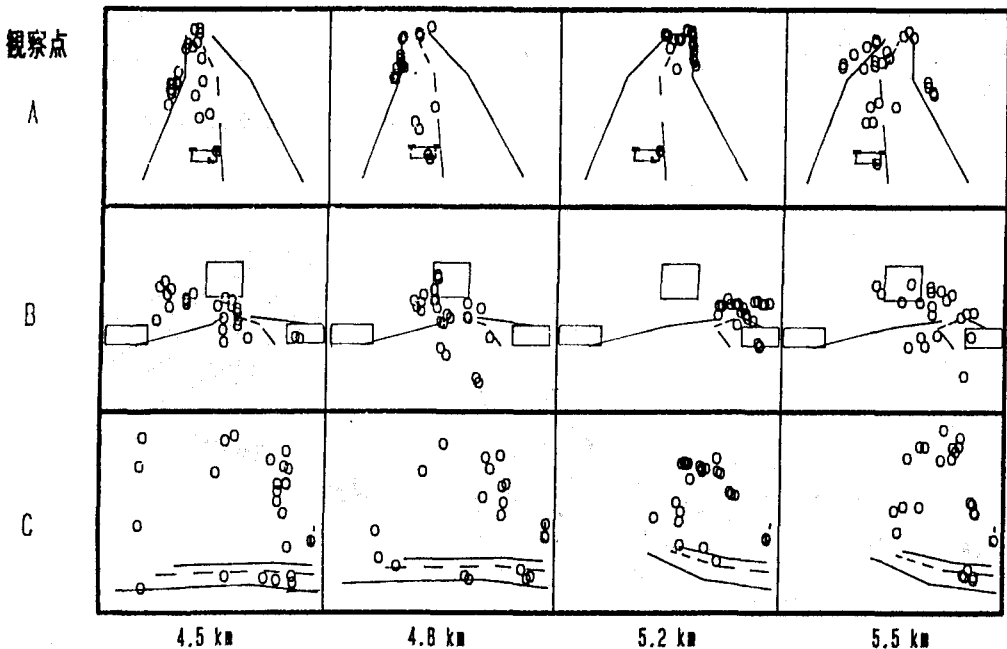


図-4 観測点A、B、Cからの運転者の注視点透視図（曲線区間、被験者A）

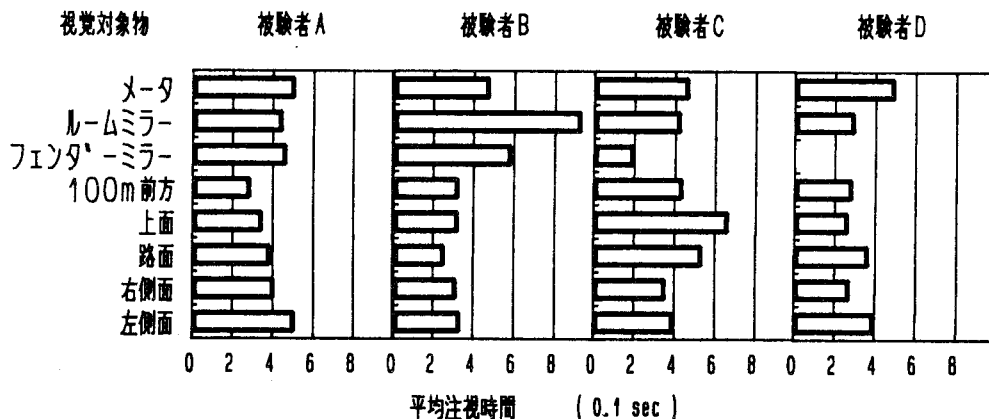


図-5 視覚対象物別の平均注視時間（曲線区間）

求めた結果、近距離と遠距離を交互に注視する傾向が見られた。また、被験者による区間別の注視距離の違いを比較した結果、道路線形との関係と思われる類似の変動が見られた。

曲線区間と直線区間の注視距離の比較を図-8に示した。注視時間と異なり平均注視距離は被験者Bを除いて3名の被験者はほぼ同じ値となった。注視距離は、道路線形の要因の他に視距や縦断勾配の影響もあり、単純に平面線形の影響が現れなかったものと思われる。

4. 注視行動の評価

運転者を情報処理者とみなし、その情報処理能力と過程に関して考察を行った研究が過去行われた。例えば、Shinarらは、曲線区間における運転者の眼球運動の測定結果から、「自動車を適切に制御するための運転者にとっての戦略は、情報の取得とその情報を使う時間を最大にすることである」とした⁵⁾⁶⁾。注視点の測定により運転者の情報処理過程に関して多くの適切なモデルが提示されたが、定量的にこれを評価した例は少ない。

そこで、本研究では、運転者の視覚による情報収集過程を、道路環境を情報源とする運転者への通信系と考え情報理論の導入を行った。運転者が注視により道路環境から得る情報量の期待値であるエントロピーを求め、エントロピーの変動から注視パタンの定量化を行った。

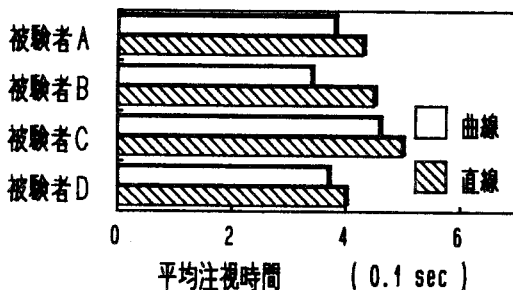


図-6 曲線区間と直線区間の平均注視時間の比較

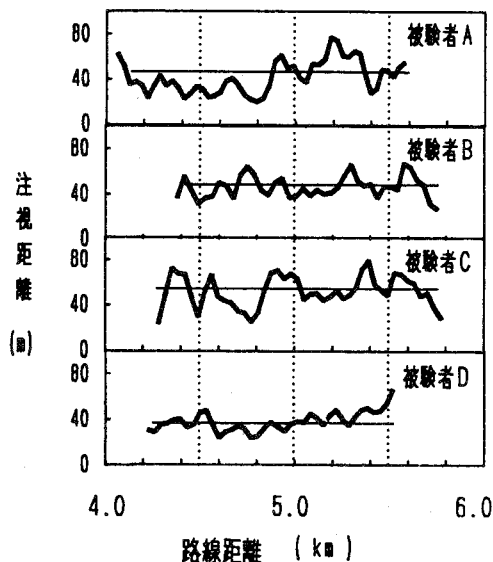


図-7 曲線区間の注視距離の変動

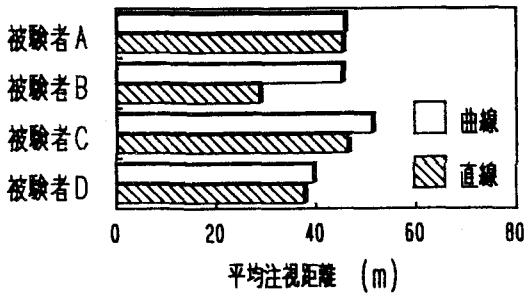


図-8 曲線区間と直線区間の平均注視距離の比較

(1) 情報量とエントロピーの定義

情報は確率事象に対して以下の式で定義される。
確率事象Eが生じたことを知ったとき、

$$I(E) = -\log_2 P(E) \quad (1)$$

$P(E)$: 事象Eの生起確率

$I(E)$: 情報量 (単位 bit)

の情報量を受け取ったという。すなわち、ある事柄についての情報量は、その事柄の生起確率に依存するものであり、生起確率が小さいほど、その事柄が生じたことを知ったときに受け取る情報量は大きくなり、また生起確率が大きくなるほど、その事柄が生じたことを知ったときに受け取る情報量は小さくなる。

エントロピーは、離散的情報源から出力される情報を一つ知らされるごとに受け取る情報量の期待値として定義され、以下の式で示される。

$$H(S) = \sum P(S_i) \log_2 (1/P(S_i)) \quad (2)$$

$H(S)$: エントロピー

S_i : 出力情報

$P(S_i)$: 出力情報 S_i の生起確率

エントロピーが最大となるのは、その出力情報が等確率に生起するときに限られる。また、エントロピーが0となるのは、出力情報が何であるか明らかであることを意味する。

(2) 道路環境とエントロピー

運転者が注視により道路環境から得る情報量からエントロピーを求めた。このとき、道路環境は離散的情報源であり、また道路環境からの出力情報は互いに統計的に独立に生起すると考えた。

注視点の解析結果から、距離50mの道路区間の注視対象の個数と注視時間を求めた。距離50mの道路区

間の注視対象を出力情報と考え、各々の出力情報の生起確率を注視時間と区間内の注視時間の合計の比から求めた。この結果を(2)式に代入し、エントロピーを計算した。測定路線での平均速度は80km/hであり、車両は毎秒22m進行する。50m区間あたりの注視時間は約2.5secであり、注視対象は最大8個程度が予測される。

エントロピーが低い場合の道路交通状況は、1個の視覚対象に注視が集中する場合である。エントロピーが高い場合は、道路状況が複雑であり必要な情報が数多く存在する場合である。

エントロピーの計算は、曲線区間と直線区間の二つの区間の測定試験の結果について行った。図-9は、曲線区間のエントロピーの計算結果であり、図-10は直線区間のエントロピーの計算結果である。50mの道路区間は、隣接する区間において25mの重複があるように設定した。エントロピーの低い区間は、少数の注視対象が長く注視される場合(注視時間で1.0sec前後)である。また、エントロピーの高い区間は、被験者が多数の注視対象を短く注視(0.3sec前後)する状況を示している。

被験者によりエントロピーの平均的なレベルの差はあるが、4名の被験者に同様なエントロピーの変動が直線・曲線の両方の区間において見られた。この傾向は、道路線形・道路上の構造物・見通し距離(視距)等の道路環境の影響が運転者の情報の収集パターンに現れ、結果としてエントロピーにより示されたものと思われる。

(3) 注視行動のエントロピーによる評価

測定を行った路線の各50m区間において実現可能なエントロピーの最大値の推定により運転時の情報収集能力の定量的な把握を行った。

エントロピーを最大にするためには、多くの注視対象を短時間に等確率で注視すればよい。しかし、各注視対象を等しい頻度でしかも等時間注視する状況は現実にはありえない。そこで、注視対象とその注視回数及び注視時間を以下のように考えた。

50m区間において 図-2で示した8個の注視対象の頻度は、曲線または直線の全区間におけるこれら8個の注視対象の頻度分布から求める。注視対象の頻度分布に50m区間を通過する時間を乗じて注視時間とする。この割り当てられた注視時間が注視対象の

最短注視時間より短い場合には、その注視対象を削除する。このような定義により、各注視対象の生起確率は（注視対象の割り当て時間／区間通過時間）となり、各区間のエントロピーを求めこれを実現可能なエントロピーの最大値とした。

図-9 と図-10に測定値から求めたエントロピーを太線で示すと同時に、この手法により推定したエ

ントロピーを細線で示した。直線区間の被験者Dを除いて、測定から求めたエントロピーの最大値と推定したエントロピーの最大値はほぼ一致した。また、直線区間の被験者Aと曲線区間の被験者Bにおいては、測定値から求めたエントロピーと呼応するかのように推定したエントロピーの変動が見られた。

さらに、直線区間と曲線区間において推定したエ

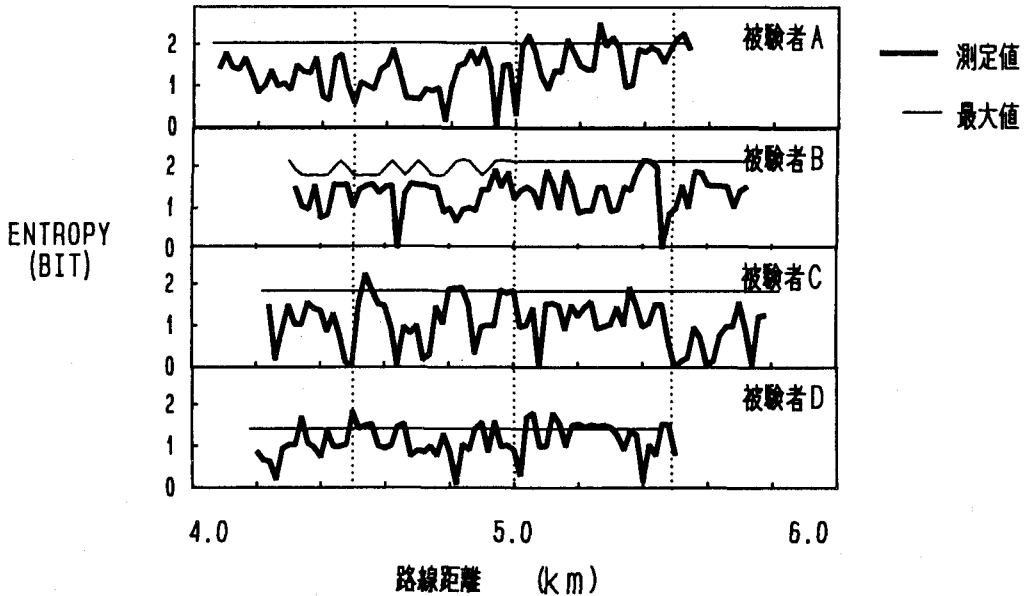


図-9 曲線区間のエントロピーの変動

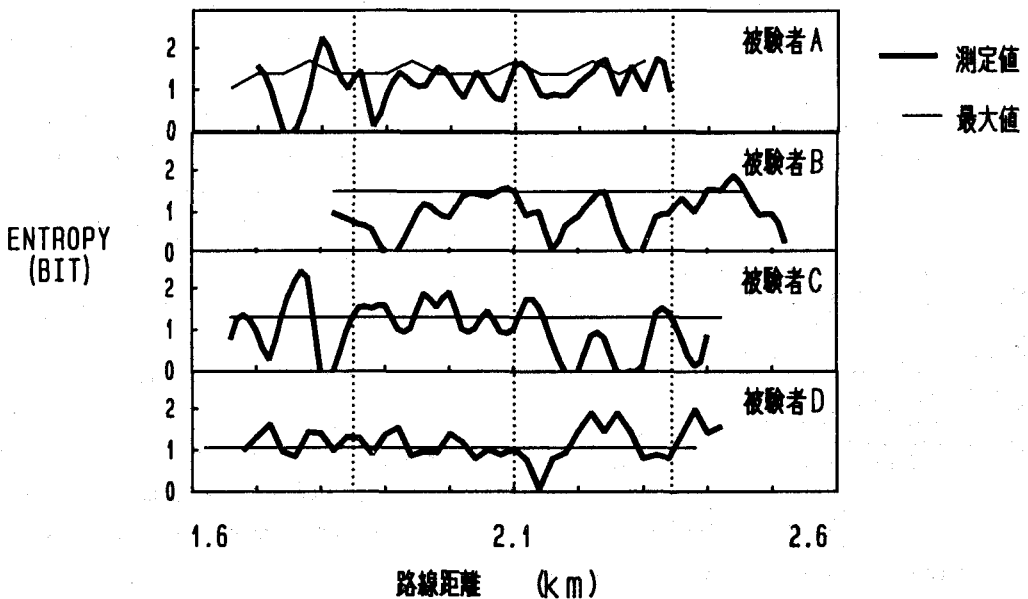


図-10 直線区間のエントロピーの変動

ントロピーの平均値を被験者別に比較した結果を図-11に示す。直線区間においては運転者は十分余裕をもって情報収集を行っている。このことは、エントロピーの減少からも明かであるが、平均注視時間が曲線区間に比べて長い、また注視対象数と種類も少ないことから理解される。

ところが、曲線区間においては、より多くの情報が必要であるため運転者は速度を低下させるなどの行動により情報収集能力を上昇させ、多くの情報を得ようとする傾向がエントロピーの結果からわかる。このとき、運転者は注視の認識時間を最小限に近いところまで短縮し、しかも多数の視覚対象を注視する行動により獲得する情報量を増やすものと思われる。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 運転者の眼球運動と頭部の運動を測定し、運転者の注視対象物を解析するシステムを確立した。
- (2) 道路全体を3次元空間内に表現し、運転者の注視点と道路線形を3次元空間に合成表示した。
- (3) 運転者の注視時間を注視対象物別に求めた。曲線区間においては、4名の被験者とも平均で0.4secの注視時間が測定された。直線区間では平均で約10%曲線区間より注視時間が延びる結果を得た。
- (4) 運転者の注視距離を、道路区間別(50 m)に求めた。区間別の平均注視距離を求めた結果、近距離と遠距離を交互に注視を繰り返す傾向が見られた。
- (5) 運転者が注視により道路環境から得る情報を定量化するため情報理論の導入を行った。エントロピーにより、道路線形・道路上の構造物・見通し距離

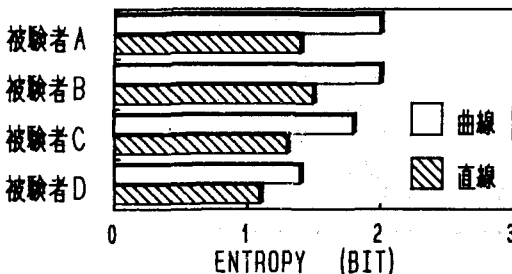


図-11 曲線区間と直線区間のエントロピーの比較

(視距)等の道路環境に影響される運転者の情報の収集パターンを示した。

今後、様々な運転状況における運転者の注視点の測定を行い、運転者の注視における限界と最適な注視パターンの把握を行っていきたい。

なお末筆ながら、本研究の実験に多大な協力をいただいた日本道路公団札幌建設局、北海道警察交通部の関係各位に感謝の意を表する次第です。

参考文献

- 1) Maurant, R.R. and Rockwell, T.H.: Driver's Eye Movement and Visual Workload., Highway Research Record, No.292, 1969
- 2) Maurant, R.R., and Rockwell, T.H.: Strategies of Visual Search by Novice and Experienced Drivers, HUMAN FACTORS, Vol.14, pp.325-335, 1972
- 3) Kaluger, N.A. and Smith, G.L.Jr.: Driver Eye-Movement Patterns under Conditions of Prolonged Driving and Sleep Deprivation., Highway Research Record, No.336, 1970
- 4) Cohen, A.S.: Augenbewegungen des Autofahrers beim Vorbeifahrer an unvorhersehbaren Hindernissen und auf freier Strecke, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Vol.22, No.2, 1976
- 5) Shinar, D., et al: Eye Movements in Curve Negotiations., HUMAN FACTORS, Vol.19, 1977
- 6) Shinar, D.: Psychology on the Road (The Human Factor in Traffic Safety), 1978
- 7) 村田隆裕、中村良夫: 自動車運転者の注視点、交通工学, Vol.5, 1970
- 8) 村田隆裕: 注視行動の統計的性質, 土木学会論文報告集, Vol.213, pp.55-63, 1973
- 9) Nagayama, et al: Motorcyclists's Visual Scanning Pattern in Comparison with Automobile Drivers., SAE Paper 79052, 1979
- 10) 加来照俊、萩原亨: ビジョンアライトによる運転者の視線追跡, テレビジョン学会報告, Vol.9, pp.7-12, 1985
- 11) 大坪, 他: 運転中の車速, 旋回および頭部回転, 眼球回転の同時測定, 交通科学協議会資料, Vol.24, 1983