

ドライバーが抱く視覚的な距離感と速度感に関する 知覚構造モデルの提案

四辻裕文* 喜多秀行**

本稿では、単独で走行中のドライバーが抱く視覚的な距離知覚構造を内包した速度知覚構造モデルを提案する。視知覚構造のモデル化を通じて、前方の路面上に存在する視覚刺激までの実距離と知覚距離の関数関係が、距離に関するニアミス型Weber比が一定ならば反比例、Weber比が一定ならば対数減少となること、また、視覚刺激の接近速度の時間変化率と知覚速度の時間変化率の関数関係が、実距離Weber比の時間変化量と知覚速度Weber比の時間変化量の比率を‘感度’と定義するならば、感度に関するべき則に従うことを示す。既往データを用いたモデル分析を通じて、速度知覚構造モデルの感度の推定によって距離知覚構造が検証可能なこと、また、感度は‘過大知覚’になることを示す。

A Model of Speed Perception Structure Including Visual Distance Perception Structure of a Driver

Hirofumi YOTSUTSUJI* Hideyuki KITA**

This paper suggests a theoretical model of speed perception structure including visual distance perception structure of a driver while driving alone. Through the modeling of visual perception structures for distance and speed, this paper shows that the functional relationship between the actual distance and the perceived distance to an optical stimulus on the road surface in driver's view can be either an inverse proportion form if the near-miss-to-Weber fraction of distance is constant, or a logarithmic decrement form if the Weber fraction of it is constant, and also shows that the functional relationship between the respective time-rate-of-changes of the oncoming and perceived speeds of the stimulus can obey a power law with respect to 'sensitivity', if a proportion of the time variation of the Weber fraction of the perceived speed to the time variation of the Weber fraction of the actual distance is defined as the sensitivity. Through the model analysis using prior research data, this paper shows that the estimate of the sensitivity in the speed perception structure model enables the distance perception structure to be verified, and also shows that the sensitivity produces 'over-perception'.

1. はじめに

ドライバーが速度計を見ずに運転する際に知覚する走行速度は、実際の速度と乖離する場合がある。

知覚速度と実速度の間に乖離が生じる原因の一つには、ドライバーが抱く速度感の影響が考えられる。交通工学や交通心理学では、速度感の実証研究において、ドライバーが知覚する自車の速度¹⁻⁴⁾、先行車との相対速度⁵⁾、先行車の減速度⁶⁾と実速度の関係はべき関数で近似できることが知られている。一方、理論的に見ても同様の関数関係が成り立つかについては必ずしも明確でなく、ドライバーの速度知覚構造に関する理論的側面には不明な点が多い。

筆者らは、ドライバーが抱く速度感は、視覚的な

* 神戸大学大学院市民工学専攻博士課程後期

Doctoral Student, Civil Engineering,
Kobe University

** 神戸大学大学院市民工学専攻教授

Professor, Civil Engineering,
Kobe University
原稿受理 2009年7月3日

距離感や移動感との関連性が大きいと考え、別稿⁷⁾でドライバーの視知覚 (visual perceptions) に関する研究をレビューした。そして、視覚心理学における「ドライバーは前方の路面上に存在する視覚刺激の配列 (optic array) を情報源として距離を知覚し、走行中に知覚する視覚刺激の流動 (optic flow: 以下、OF) から自己移動を知覚できる」というOFに関する知覚理論が、速度知覚構造のモデル化の理論的基盤として有益であることを示した。しかし、別稿⁷⁾では、そのモデルを明示するに至っていない。

そこで本稿では、ドライバーが走行中に得た視覚情報に基づく距離知覚構造のモデル化を通じて、速度知覚構造の理論モデルを構築する。このモデルは、ドライバーの知覚反応を明示的に組み込んだ工学的な速度超過事故対策を検討する上で有効なツールの一つになると期待できる。

本稿では、後ほど示すように、速度知覚構造が、視距距離や知覚速度のWeber比から求められる「感度」という新たな指標の導入によって、ベキ関数で表されることを導き出す。この理論的帰結は、速度感に関する従来の実証的な経験則に対し、理論的な裏づけを与えるものである。また、距離知覚構造のモデル化の結果、距離知覚に関する従来経験則とは異なるモデルが理論的に導き出される。しかし、本稿で提案する速度知覚構造モデルは、距離知覚に関する理論モデルと経験則の両方を内包した枠組みでモデル化される。そのため、提案する速度知覚構造モデルを用いてドライバーの速度感を実証分析すれば、距離知覚構造も検証できる仕組みになっている。ドライバーが抱く距離感や速度感に関するこのような実証分析の枠組みは、著者らの知る限りない。

本稿で提案する速度知覚構造モデルは、速度効用

最大化を仮定したドライバーの速度選択に基づく運転行動分析フレームに組み込み易いものである。このようなフレームが構築できれば、運転中の意志決定が合理的でも、距離や速度の知覚エラーによって結果的に潜在的な事故危険状態にあるドライバーに対して、知覚エラーを未然に回避するような予防安全対策の効果を実証的に分析可能となる。この意味において、提案する知覚構造モデルは、交通安全対策の効果分析にも役立つツールと考える。

2. 速度知覚構造のモデル化

2-1 モデル化の枠組み

走行中のドライバーは、前方に見える移動風景の中で視覚刺激のOFを知覚でき、逆に、移動風景が提供するOFをもとに自己移動速度を知覚できる。OFは、数理的には、網膜上に投影された視覚刺激の時空間変化量で表され、注視焦点から視野全体に拡大する瞬時の速度場として定義できる^{8,9)}。OFのモデル化は数多く提案されている。詳細は別稿⁷⁾に譲るが、本稿ではLee^{9,10)}の枠組みを援用し、Fig.1に示す枠組みを考える。Fig.1において、網膜上に投影された視覚刺激の時空間変化量は、視覚刺激とその網膜像とを結んだ線が注視焦点方向に対してなす視角の時間変化量で表される。

Fig.1では、ドライバーはある注視焦点を見て眼の高さ H を一定としながら、直線的に前進している。注視焦点の方向は、進行方向から常に視角 ω を有しているとする。自動車の進行方向は、路面の縦断勾配にかかわらず、路面に平行である。ドライバーは速度計を見ずに運転し、そのため時刻 t の自車の走行速度 v_o' は未知である。ドライバーは、時刻 t に前方の実距離 L' にある視覚刺激を知覚する。この視覚刺激は、相対速度 $|-v_o'|$ でドライバーに向かって接近する。視覚刺激は、水晶体までの距離を1に規準化した網膜上に逆像として投影される。視覚刺激とその網膜像とを結んだ線が注視焦点方向の視線との間になす視角を θ' とすると、ドライバーは $\theta'+\omega$ の微小時間変化から、網膜像の速度 v_s' を知覚する。 v_s' と v_o' は異なる。 v_s' は、網膜上の知覚距離 h' の位置で、注視焦点から拡大するOFを形成する。

2-2 距離知覚構造モデルの導出

Fig.1より、知覚距離 h' ならびに実距離 L' と、視角 $\theta'+\omega$ との関係を求める。後ほどの議論の見通しを良くするために、今、実距離 L' が、

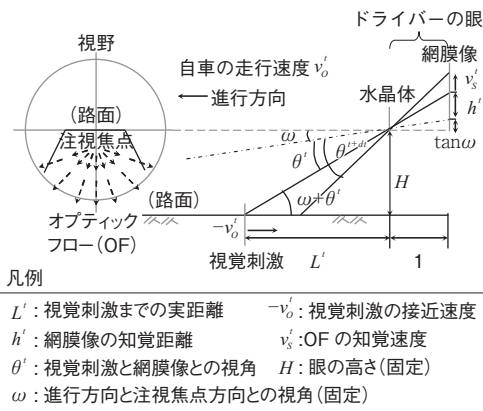


Fig. 1 Optic Flowのモデル化の枠組み

$$\tilde{L}' \equiv \frac{L'^{\delta-1}}{\delta-1} \quad \dots\dots(1)$$

で定義される \tilde{L}' に歪められているとする。すると、 $\theta'+\omega$ の時間変化量は、次式のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{d(\theta'+\omega)}{dt} &= \frac{d}{dt} \tan^{-1}(h'+\tan\omega) \\ &= \frac{1}{1+(h'+\tan\omega)^2} \frac{dh'}{dt} \quad \dots\dots(2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d(\theta'+\omega)}{dt} &= \frac{d}{dt} \tan^{-1} \frac{H}{\tilde{L}'} \\ &= \frac{-H}{(L')^\delta \{1+(H/\tilde{L}')^2\}} \frac{dL'}{dt} \quad \dots\dots(3) \end{aligned}$$

式(2)(3)より、次式を得る。

$$dh' = -\frac{H}{(L')^\delta} dL' \quad \dots\dots(4)$$

$$h'+\tan\omega = \frac{H}{\tilde{L}'} \quad \dots\dots(5)$$

式(4)(5)は、ドライバーの距離知覚構造モデルを表す。以下、 \tilde{L}' の知覚の仕方に応じて、式(5)がどのようにモデル化されるかについて考察する。

まず、 L' に完全に歪みがない場合を考える。これは、式(1)で $\delta=2$ の場合であり、 $\tilde{L}'=L'$ の場合である。今、ドライバーが L' の微小変化 dL' を弁別可能(differentiable)なとき、 dL'/L' を距離のWeber比と呼び、 $dL'/L'=k$ (k :一定)をWeberの法則と呼ぶ。Weberの法則の支持のもと、距離変化の知覚量 dh' が dL'/L' に比例するという経験則を、Fechnerの法則と呼ぶ。一方、 $dL'/(L')^\delta = k'$ (k' :一定)をNear-miss-to-Weberの法則と呼ぶ。本稿ではこの $dL'/(L')^\delta$ を、ニアミス型Weber比と呼ぶことにする。 $dL'/(L')^\delta$ が一定ならば $dL'/L'=k/(L')^{1-\delta}$ となり、Weber比は $(L')^{1-\delta}$ に依存する。 $\delta=2$ の場合、式(4)より、距離のニアミス型Weber比 $dL'/(L')^2$ が常に一定ならば、距離変化の知覚量 dh' はニアミス型Weber比に比例するという一般化されたFechnerの法則が成り立つ。このとき、式(5)より、 $h'+\tan\omega$ と L' は反比例の関係になる。Weber比の考察の詳細は、別稿⁷⁾に譲る。

次に、 L' に完全に歪みがある場合を考える。これは、式(1)で $\delta=1$ の場合である。式(4)より、距離のWeber比 dL'/L' が常に一定ならば、距離変化の知覚量 dh' はWeber比に比例するというFechnerの法則が成り立つ。このとき、 $h'+\tan\omega$ と L' は対数減少の関

係になる(付録【証明1】を参照)。

以上のように、式(5)における $h'+\tan\omega$ と L' の関係は、 L' に完全に歪みがない場合は反比例、 L' に完全に歪みがある場合は対数減少となる。式(5)を反比例と対数減少のどちらでモデル化するべきかについては、走行中のドライバーが抱く距離感に関してニアミス型Weber比一定仮説とWeber比一定仮説のいずれを支持するかに依存する。

交通工学では、先行車が存在するときの距離知覚構造のモデル化において、距離のWeber比一定仮説が支持されることが多い¹¹⁾。この経験則は、視覚刺激までの距離 L' に完全に歪みがある場合($\delta=1$)に相当する。歪み \tilde{L}' の程度が $1 \leq \delta < 2$ のとき、 \tilde{L}' は L' に対して常に $L' > \tilde{L}'$ となる。一方、先行車が存在しないときの距離知覚は、 L' に完全に歪みがない($\delta=2$)、つまり $\tilde{L}'=L'$ の場合であり、ニアミス型Weber比一定仮説が支持されると考えられる。

本稿で提案する式(4)(5)の距離知覚構造モデルは、いずれの距離Weber比仮説を支持するにしても対応できる枠組みとなっている。どちらの仮説が妥当かについては、後ほど提案する速度知覚構造モデルの感度が、検証の指標の役目を果たすことになる。

2-3 運転挙動と速度知覚の関係

視覚刺激の接近速度 $| -v'_o |$ と知覚速度 v'_s を各々、 $| -v'_o | \equiv | -dL'/dt |$ 、 $| v'_s | \equiv | dh'/dt |$ と定義する。すると、式(4)より、次式を得る。

$$| v'_s | = \frac{H}{(L')^\delta} | -v'_o | \quad \dots\dots(6)$$

式(6)より、次式を得る(付録【証明2】を参照)。

$$\frac{dv'_s}{| v'_s |} = \frac{dv'_o}{| -v'_o |} + \delta \frac{dL'}{L'} \quad \dots\dots(7)$$

ここで、任意の時刻 τ と時刻 $\tau+1$ における速度知覚の関係を考える。時刻 $\tau+1$ は、時刻 τ の微小時間 dt と一致しなくてもよい。式(7)より、時刻 $\tau+1$ と時刻 τ の差分をとれば、次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \frac{dv'_s{}^{\tau+1}}{| -v'_o{}^{\tau+1} |} - \frac{dv'_s{}^\tau}{| -v'_o{}^\tau |} \\ = \frac{dv'_s{}^{\tau+1}}{| v'_s{}^{\tau+1} |} - \frac{dv'_s{}^\tau}{| v'_s{}^\tau |} - \delta \left[\frac{dL'}{L'^{\tau+1}} - \frac{dL'}{L'^\tau} \right] \quad \dots\dots(8) \end{aligned}$$

以下では、式(8)に基づき、運転挙動と速度知覚との関係を考察する。視覚刺激の速度と距離に関するWeber比と運転挙動との関係【補題1、2】より、知

Table 1 運転挙動と実速度Weber比との関係

| | |
|------|---|
| 等速 | $\frac{dv_o^{\tau+1}}{ -v_o^{\tau+1} } = \frac{dv_o^\tau}{ -v_o^\tau }$ |
| 等加速度 | $\frac{dv_o^{\tau+1}}{ -v_o^{\tau+1} } < \frac{dv_o^\tau}{ -v_o^\tau }$ |
| 等減速度 | $\frac{dv_o^{\tau+1}}{ -v_o^{\tau+1} } > \frac{dv_o^\tau}{ -v_o^\tau }$ |

Table 2 運転挙動と実距離Weber比との関係

| | |
|------|---|
| 等速 | $\frac{dL^{\tau+1}}{L^{\tau+1}} > \frac{dL^\tau}{L^\tau}$ |
| 等加速度 | $\frac{dL^{\tau+1}}{L^{\tau+1}} > \frac{dL^\tau}{L^\tau}$ |
| 等減速度 | $\frac{dL^{\tau+1}}{L^{\tau+1}} \begin{cases} < \\ \geq \end{cases} \frac{dL^\tau}{L^\tau}$ |

Table 3 運転挙動と知覚速度Weber比との関係

| | |
|------|---|
| 等速 | $\frac{dv_s^{\tau+1}}{ v_s^{\tau+1} } > \frac{dv_s^\tau}{ v_s^\tau }$ |
| 等加速度 | $\frac{dv_s^{\tau+1}}{ v_s^{\tau+1} } > \frac{dv_s^\tau}{ v_s^\tau }$ |
| 等減速度 | $\frac{dv_s^{\tau+1}}{ v_s^{\tau+1} } \begin{cases} < \\ \geq \end{cases} \frac{dv_s^\tau}{ v_s^\tau }$ |

Table 4 運転挙動に対する式(8)の各項の関係

| | $dv_s^{\tau+1} - dv_s^\tau$ | $ v_s^{\tau+1} - v_s^\tau $ | $\frac{dv_s^{\tau+1}}{ v_s^{\tau+1} } - \frac{dv_s^\tau}{ v_s^\tau }$ | $\frac{dv_o^{\tau+1}}{ -v_o^{\tau+1} } - \frac{dv_o^\tau}{ -v_o^\tau }$ | $\delta \left \frac{dL^{\tau+1}}{L^{\tau+1}} - \frac{dL^\tau}{L^\tau} \right $ |
|------|-----------------------------|-------------------------------|---|---|---|
| 等速 | ≥ 0 | > 0 | > 0 | $= 0$ | > 0 |
| 等加速度 | ≥ 0 | ≥ 0 | > 0 | < 0 | > 0 |
| 等減速度 | ≤ 0 ≥ 0 | ≤ 0 ≥ 0 | ≤ 0 ≥ 0 | > 0 > 0 | ≤ 0 ≥ 0 |

覚速度と運転挙動に関する【命題】を得る。

【補題1】各運転挙動に対して、実速度Weber比はTable 1の関係をもつ(付録【証明3】を参照)。

【補題2】各運転挙動に対して、実距離Weber比はTable 2の関係をもつ(付録【証明4】を参照)。

【命題】各運転挙動に対して、知覚速度Weber比はTable 3の関係をもつ。【補題1、2】より、式(8)の各項はTable 4の関係をもつ(付録【証明5】を参照)。

【命題】のTable 3は、注視焦点から視野全体に拡大するOFの知覚の仕方と、各運転挙動との関係を示す。すなわち、等速あるいは等加速度で運転しているドライバーは、注視焦点の近傍のOFよりも、視野の周辺部のOFのほうが、より速く流動していると知覚していることを示唆する。一方、等減速度で運転しているドライバーによるOFの知覚は、等速あるいは等加速度の場合ほど単純ではなく、Table 4に示すような複雑なふるまいをする。この点についてはこれ以上言及しないが、速度知覚構造モデルの導出という本稿の目的には差し支えないと考える。

2-4 速度知覚モデルの導出

式(8)をもとに、速度知覚構造をモデル化する。今、次式で定義される新たな指標 $\alpha_{\tau+1}$ を導入する。

$$\alpha_{\tau+1} \equiv \frac{dv_s^{\tau+1}/v_s^{\tau+1} - dv_s^\tau/v_s^\tau}{dL^{\tau+1}/L^{\tau+1} - dL^\tau/L^\tau} \quad \dots\dots(9)$$

$\alpha_{\tau+1}$ は、視覚刺激に対する距離Weber比の時間変化量と知覚速度Weber比の時間変化量との比率を表す。本稿では、これを「感度(sensitivity)」と呼ぶことにする。

式(9)の感度を用いて式(8)を展開し、次式を得る。

$$\begin{aligned} & \frac{dv_o^{\tau+1}}{|-v_o^{\tau+1}|} - \frac{dv_o^\tau}{|-v_o^\tau|} \\ &= \left[1 - \frac{\delta}{\alpha_{\tau+1}} \left(\frac{dv_s^{\tau+1}}{|v_s^{\tau+1}|} - \frac{dv_s^\tau}{|v_s^\tau|} \right) \right] \dots\dots(10) \end{aligned}$$

両辺を積分し、積分定数を $C_{\tau+1}$ とすると、次式を得る。

$$\frac{|-v_o^{\tau+1}|}{|-v_o^\tau|} = C_{\tau+1} \left(\frac{|v_s^{\tau+1}|}{|v_s^\tau|} \right)^{1 - \frac{\delta}{\alpha_{\tau+1}}} \quad \dots\dots(11)$$

式(11)は、ドライバーの速度知覚構造モデルを表す。視覚情報に基づく距離知覚構造モデルをもとに速度知覚構造をモデル化した結果、式(11)が示すように、視覚刺激の接近速度の時間変化率とその知覚速度の時間変化率の関数関係は、感度に関するベキ構造をもつことが、理論的に導き出される。

ここで、式(11)のベキ項の符号条件を考える。ある $c_{\tau+1}$ に対し $1 - \delta/\alpha_{\tau+1} > 1$ ならば、式(11)は、ドライバーが減速(加速)を知覚したよりも実際には減速(加速)していることを示す。一方、 $0 < 1 - \delta/\alpha_{\tau+1} < 1$ ならば、減速(加速)を知覚したほど実際には減速(加速)していないことを示す。本稿では、前者を

過小知覚、後者を過大知覚と呼ぶことにする。2-2で見たように、ドライバーの距離知覚構造において、パラメータ δ は $\delta > 0$ である。したがって、ドライバーの速度知覚構造は、過小知覚でなく、過大知覚になることが理論的に導き出される。この点については、後ほど、実証データを用いて検証する。

2-5 距離知覚の歪みと速度知覚の感度の関係

本節では、距離知覚に関する L の歪み \bar{L} と、速度知覚の感度 α_{t+1} との関係を考察する。

式(1)のベキ定数は非負だから、次の条件を得る。

$$\alpha_{t+1} \geq \delta \quad \dots\dots(12)$$

2-2で見たように、距離知覚のWeber比に関して支持する仮説が、ニアミス型Weber比一定仮説とWeber比一定仮説のいずれを採用するかによって、パラメータ δ が異なる。ニアミス型Weber比一定仮説が支持されるならば、つまり L に完全に歪みがない ($\delta=2$) ならば、速度知覚に関する感度 α_{t+1} は、 $\alpha_{t+1} \geq 2$ を満たす。一方、 L に $1 \leq \delta < 2$ の程度の歪みがあるならば、 $\alpha_{t+1} \geq 1$ を満たす。特に、Weber比一定仮説が支持されるならば、つまり L に完全に歪みがある ($\delta=1$) ならば、式(9)の感度の定義より、感度の逆数 $1/\alpha_{t+1}$ はゼロになる。このとき、式(1)の速度知覚構造モデルのベキ定数は1になる。このことは、先行車との車間距離を保って運転するドライバーの速度知覚構造に関するモデルが、実速度比と知覚速度比の比例関係で表されることを示唆する。

2-6 注視焦点が速度知覚の感度に及ぼす影響

本節では、先行車が存在しない状況のもとで、走行中のドライバーが注視焦点を視界の奥あるいは手前に向けて走行する場合を想定し、注視焦点方向の視角 ω と速度知覚の感度 α_{t+1} との関係を考察する。

ここでは、先行車は存在しないとするので、式(1)(4)(5)で $\delta=2$ の場合を考える。今、便宜上、視角 $\omega=0$ に対する感度を α_{t+1}^0 、任意の視角 $\omega=\bar{\omega}$ に対する感度を $\bar{\alpha}_{t+1}$ と表記する。このとき、式(1)のベキ定数に関して、 α_{t+1}^0 と $\bar{\alpha}_{t+1}$ の関係は、

$$1 - \frac{\delta}{\bar{\alpha}_{t+1}} = 1 - \frac{\delta}{\alpha_{t+1}^0} - \delta \frac{\tan \bar{\omega}}{H} \Delta \quad \dots\dots(13)$$

ただし、

$$\Delta = \frac{dL^{t+1} - dL^t}{dv_s^{t+1}/v_s^{t+1} - dv_s^t/v_s^t} \quad \dots\dots(14)$$

を満たす(付録【証明6】を参照)。

ここで、運転挙動と Δ の関係を見る。まず、等速走行の場合、 $dL^{t+1} = dL^t$ だから式(14)より $\Delta=0$ となり、式(13)より、 α_{t+1}^0 と $\bar{\alpha}_{t+1}$ は一致する。これは、等速走行ならば、ドライバーが抱く速度感は注視焦点の方向に依存しないことを意味する。次に、等加速度走行の場合、 $dL^{t+1} > dL^t$ だからTable 4より式(14)は $\Delta > 0$ となり、式(13)より、 $1 - \delta/\bar{\alpha}_{t+1} < 1 - \delta/\alpha_{t+1}^0$ の関係を満たす。これは、注視焦点の方向を視角 $\omega=\bar{\omega}$ の位置において等加速度走行する場合は、視角 $\omega=0$ で等加速度走行する場合よりも、速度感が過小評価されていることを意味する。つまり、例えば定速度が2倍に加速するとき、ドライバーの速度感は2倍ほどにはならないが、その程度は、注視焦点方向が視界の手前に向けられているほど大きいことを意味する。したがって、等加速度走行する際には、なるべく遠くを見ていることが交通安全上重要であるということが理論的に導き出される。最後に、等減速度走行の場合、注視焦点方向に応じて速度感は変化するが、等加速度走行の場合とは異なり、式(13)は、Table 4で見たような複雑なふるまいをすることになる。

3. 速度知覚構造モデルの検証

以下では、既存文献¹⁾が提示する実証データをもとに、速度知覚構造モデルの妥当性を検証する。なお、この文献自体が古く、また、一つの文献のデータを対象を限っての検証であることから、以下の結果はモデルの完全な妥当性を保証するものではない。追加的な検証についての報告は別の機会に譲る。

当該データは、屋外実走実験によるものであった。実験の概容は、速度計を見ていない実験参加者(ドライバー)が、ある速度比で速度評定を行うというものであった。実験内容を見ると、まず、ドライバーは、実験者が示したある基準速度でしばらく走行する。次に、実験者は、基準速度に対してある速度比を指定し、ドライバーに対してその速度比に該当する速度で走行するように指示し、速度計を隠す。最後に、ドライバーは、速度調整のあと、指定速度比に該当すると主観的に評定した瞬間を実験者に報告し、実験者は、その瞬間の実速度を速度計から計測する、というものであった。

当該実験では、基準速度の大きさを20km/hrから100km/hrまでの間の計八つとし、各々の基準速度に対して指定速度比を1/2倍、等倍、2倍に設定している。これを本稿の枠組みで説明すると、ドライ

Table 5 実験で得られたデータ¹⁾

| 基準 | 16 | 24 | 32 | 40 | 48 | 64 | 80 | 96 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1/2 | — | — | 22.4 | — | 34.6 | 43.5 | 52.0 | 61.4 |
| 等倍 | 19.4 | 27.1 | 33.9 | 40.4 | 46.6 | — | — | — |
| 2倍 | 31.7 | 43.0 | 53.4 | 60.4 | 70.1 | — | — | — |

単位: km/hr

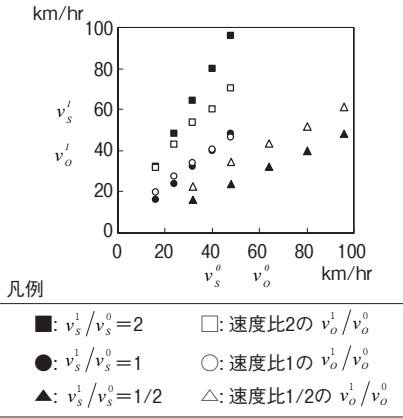


Fig. 2 実速度と知覚速度の乖離

バーが、ある基準速度 v_s^0 に対して、速度比 v_s^1/v_s^0 を1/2、1、2と主観的に評定した瞬間に、実際の速度比 v_o^1/v_o^0 を計測するということになる。ただし、表記の便宜上、ここでは $\tau=0$ としている。

当該文献が提示したデータを Table 5 に示し、それを整理して Fig.2 に図示する。Table 5 において基準速度が端数である理由は、基準速度走行時の実速度を平均しているからである。Fig.2 より、等速の場合、ドライバーは、基準速度が低速域にあるときは実速度を速く知覚し、高速域にあるときは遅く知覚していることが読み取れる。また、1/2倍に減速する場合、実速度を速く知覚する一方で、2倍に加速する場合、逆に遅く知覚していることが読み取れる。このような傾向は、2-4 で見たように、ドライバーの速度知覚構造が、過大知覚になっていることを示唆している。

次に、Table 5 のデータを用いて、ドライバーの速度知覚構造が、式(1)に示したような実速度比と知覚速度比のべき関数で表されることの統計的妥当性を検証する。そのために、次式に対して非線形回帰分析を行い、帰無仮説 $H_0: \beta_0=0$ を検定する。

$$\frac{v_o^1}{v_o^0} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \left(\frac{v_s^1}{v_s^0} \right)^{\beta_2} \quad \dots\dots(15)$$

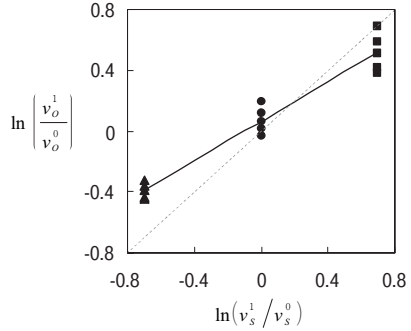


Fig. 3 実速度比と知覚速度比の関係

回帰分析の結果、 $\hat{\beta}_0 = -0.086$ 、 t 値は -0.097 ($p = 0.924$)となり、Table 5 のデータを対象に限れば、帰無仮説 H_0 は棄却されない。したがって、当該データに対して、式(1)の速度知覚構造は妥当と言える。

そこで、次に、式(5)で $\beta_0=0$ とおき、 β_1 と β_2 の推計値から、ドライバーの速度知覚構造を分析する。そのために、次式に対して回帰分析を行う。

$$\ln \left[\frac{v_o^1}{v_o^0} \right] = \beta_1 + \beta_2 \cdot \ln \left[\frac{v_s^1}{v_s^0} \right] \quad \dots\dots(16)$$

回帰分析の結果、 $\hat{\beta}_1 = 0.065$ 、 t 値は 2.814 ($p = 0.015$)、 $\hat{\beta}_2 = 0.652$ 、 t 値は 15.985 ($p = 6 \times 10^{-10}$)となる。この結果を Fig.3 に図示する。Fig.3 は、実速度比と知覚速度比に乖離があることを示す。このような乖離が生じる理由は、 $\hat{\beta}_2 < 1$ であり、速度知覚構造が過大知覚しているためである。当該データに限れば、2-4 で見たように、「速度知覚構造は、理論的には、過小知覚でなく、過大知覚になる」という理論的帰結が裏付けられた結果となる。

最後に、 $\hat{\beta}_2$ から感度 α_1 を推計する。当該実験では注視焦点方向の視角を $\omega=0$ としたため、感度 α_1 の推計値は、 $\hat{\alpha}_1 = \delta / (1 - \hat{\beta}_2)$ となる。推計の結果、 $\hat{\alpha}_1 = 2.872 \delta$ を得る。 $1 \leq \delta \leq 2$ に対して、 $\hat{\alpha}_1 > 2$ である。これはつまり、距離知覚に関してニアミス型 Weber比一定仮説が支持されることを意味する。

以上のように、本稿で提案した速度知覚構造モデルを用いれば、走行中のドライバーの距離知覚に関して、Weber比一定仮説とニアミス型 Weber比一定仮説のどちらを支持するのが妥当かを検証できる。

4. おわりに

本稿では、ドライバーが走行中に得る視覚情報に基づいた距離知覚構造のモデル化を通じて、速度知

覚構造に関する理論モデルを構築した。本稿で得られた成果を整理すると、以下ようになる。

(1)距離に関するニアミス型Weber比一定仮説とWeber比一定仮説のどちらを支持するかによって、知覚距離と実距離の関係が反比例または対数減少となり、距離知覚構造のモデルが異なるということを示した点である。これまで交通工学の分野では、「先行車に対する距離知覚は、距離Weber比一定を仮定する」という経験則が採用されることが多かった。しかし、本稿で見たように、先行車が存在しないときの距離知覚構造のモデル化では、ニアミス型Weber比一定仮説が支持される可能性がある。一方、本稿で提案したモデルの枠組みでは、距離Weber比に関してどちらの仮説を支持するにしても、速度知覚構造モデルの「感度」を用いて距離知覚構造を推測することができ、距離知覚に関して支持すべき仮説が検証可能となっている。このような検証方法は、距離感や速度感に関する実証的アプローチでは困難であり、本稿で知覚構造のモデル化に理論的アプローチを採用した利点の一つと言える。

(2)速度知覚構造のモデル化を通じて、視覚刺激の接近速度とその知覚速度の関数関係は、「感度」に関するベキ構造をもつことを理論的に導き出した点である。この結果は、既往研究にある「速度感を実証的にベキ関数で近似できる」という経験則と一致する。また、このモデルによって、等速あるいは等加速度で走行中のドライバーは、注視焦点近傍のOFよりも、視野周辺のOFのほうが、より速いと知覚していることが理論的に説明できる。これは、視覚心理学で指摘されているドライバーの実感と合致する知見であるが、本稿で改めて理論的アプローチによる説明を加えたという点が有益であると考えられる。さらに、注視焦点方向と速度感の関係について、等速走行ならば速度感注視焦点方向に依存しないが、等加速度走行する際には、なるべく速くを見ていたほうが、速度認識にエラーが生じにくいということが理論的に説明できたという点も、交通安全上、重要な知見と言える。

(3)本稿で提案した速度知覚構造モデルの感度の条件より、ドライバーが抱く速度感注視焦点方向は過小知覚でなく過大知覚になることを示した点である。この点は、限られたデータではあったが、モデル検証によって統計的に裏付けられる結果となった。

最後に、残された課題に若干触れる。筆者らは、知覚構造を組み込んだ運転行動分析フレームの構築

を目指している。本稿では、比較的単純な枠組みの中で知覚構造のモデル化を行っているが、それは、運転行動分析フレームへの知覚構造モデルの組み込み易さを念頭に置いたものであり、知覚レベルで過度に複雑なモデル化は避けるべきとの考えからである。本稿では、直線的な前進走行のみを対象としており、ステアリングによる運転挙動は無視している。このような左右方向の挙動を加味しても、速度知覚構造モデルはベキ関数で表すことができるかは必ずしも明確でない。この点は、今後の課題としたい。

付録

【証明1】

添字 t は省略する。式(4)で $\delta=1$ とおき、積分定数を $H\delta/(\delta-1)-\tan\omega$ とおいて両辺を積分すると、式(5)の \tilde{L} は $\ln L+1/(\delta-1)$ となる。一方、 $\tilde{L}=L^\sigma/\sigma$ (ただし、 $\sigma=\delta-1$) について、ロピタルの定理より $\lim_{\sigma \rightarrow 0} (L^\sigma-1)/\sigma=\ln L$ だから、 $\lim_{\sigma \rightarrow 0} [\tilde{L}-(1+\sigma \ln L)/\sigma]=0$ を満たす。故に、式(5)は、 $h+\tan\omega=H/(\ln L+1/\sigma)$ Q. E. D.

【証明2】

$a'_o \equiv dv'_o/dt$ 、 $a'_s \equiv dv'_s/dt$ と定義し、式(6)を t で微分して以下に展開すると、式(7)を得る。

$$\begin{aligned} |a'_s| &= -\frac{\delta H}{(L')^{1+\delta}} |v'_o| \cdot \frac{dL'}{dt} + \frac{H}{(L')^\delta} |a'_o| \\ &= \frac{\delta H}{(L')^{1+\delta}} |v'_o|^2 + \frac{H}{(L')^\delta} |a'_o| \\ &= \frac{\delta}{L'} |v'_s| |v'_o| + \frac{|v'_s|}{|v'_o|} |a'_o| \\ \therefore \frac{|a'_s|}{|v'_s|} &= \frac{|a'_o|}{|v'_o|} + \delta \frac{|v'_o|}{L'} \\ \therefore \frac{dv'_s}{|v'_s|} &= \frac{dv'_o}{|v'_o|} + \delta \frac{dL'}{L'} \end{aligned}$$

【証明3】

等速走行ならば、 $dv'_o/dt=dv'_s/dt=0$ 、かつ $|v'_o|^{t+1}=|v'_o|$ が成立。等加速度走行ならば、 $dv'_o/dt=dv'_s/dt$ 、かつ $|v'_o|^{t+1}>|v'_o|$ が成立。等減速度走行ならば、 $dv'_o/dt=dv'_s/dt$ 、かつ $|v'_o|^{t+1}<|v'_o|$ が成立。Q. E. D.

【証明4】

Fig.1より、 $0 < L^{t+1}/L^t < 1$ が成立。等速ならばに等

加速度走行ならば、 $dL^{t+1}=(>)dL^t$ より、 $dL^{t+1}=(>)dL^t > (L^{t+1}/L^t)dL^t$ が成立。一方、等減速度走行ならば、 $dL^{t+1}<dL^t$ より、 $dL^t > (L^{t+1}/L^t)dL^t \geq dL^{t+1}$ 、あるいは、 $dL^t > dL^{t+1} \geq (L^{t+1}/L^t)dL^t$ が成立。Q. E. D.

【証明 5】

$0 < (L^{t+1}/L^t)^\delta < 1$ が成立。式(6)より、

$$|v_s^{t+1}| - |v_s^t| = \frac{H}{(L^{t+1})^\delta} \left\{ |-v_o^{t+1}| - \left(\frac{L^{t+1}}{L^t} \right)^\delta |-v_o^t| \right\}$$

等速（等加速度）ならば、 $|-v_o^{t+1}|=(>)|-v_o^t|$ より、 $|-v_o^{t+1}|=(>)|-v_o^t| > (L^{t+1}/L^t)^\delta |-v_o^t|$ を満たす。 $|v_s^{t+1}| > |v_s^t|$ となり、 $dv_s^{t+1} \geq dv_s^t$ が成立。等減速度ならば、 $|-v_o^{t+1}| < |-v_o^t|$ より、補題2の $dL^t > (L^{t+1}/L^t)dL^t \geq dL^{t+1}$ に対して、 $|-v_o^t| > (L^{t+1}/L^t)^\delta |-v_o^t| \geq |-v_o^{t+1}|$ を満たす。 $|v_s^{t+1}| \leq |v_s^t|$ となり、 $dv_s^{t+1} \leq dv_s^t$ が成立。

また、補題2の $dL^t > dL^{t+1} \geq (L^{t+1}/L^t)dL^t$ に対し、 $|-v_o^t| > |-v_o^{t+1}| \geq (L^{t+1}/L^t)^\delta |-v_o^t|$ を満たす。 $|v_s^{t+1}| \geq |v_s^t|$ となり、 $dv_s^{t+1} \geq dv_s^t$ が成立。以上より、式(8)の右辺に対して、補題1ならびに補題2の関係から、Table 4を得る。Q. E. D.

【証明 6】

式(1)(5)で $\delta = 2$ とおくと、 $\omega = \bar{\omega}$ のとき $h^t + \tan \bar{\omega} = H/L^t$ 、 $\omega = 0$ のとき $h^t = H/L^t$ だから、 $dL^t/L^t = h^t dL^t / H + \tan \bar{\omega} dL^t / H$ より、 $\frac{1}{\bar{a}_{t+1}} = \frac{1}{a_{t+1}^0} + \frac{\tan \bar{\omega}}{H} \Delta$ が成立。Q. E. D.

参考文献

1) Denton, G. G.: A Subjective Scale of Speed when Driving a Motor Vehicle, *Ergonomics*, Vol.9, No.3, pp.203-210, 1966
 2) Evans, L.: Speed Estimation from a Moving Automobile, *Ergonomics*, Vol.13, No.2, pp.219-230, 1970

3) Semb, G.: Scaling Automobile Speed, *Perception & Psychophysics*, Vol.5, No.2, pp.97-101, 1969
 4) Recarte, M. A., Nunes, L. M.: Perception of Speed in an Automobile: Estimation and Production, *Journal of Experimental Psychology Applied*, Vol.2, No.4, pp.291-304, 1996
 5) Hoffmann, E. R., Mortimer, R. G.: Scaling of Relative Velocity between Vehicles, *Accident Analysis & Prevention*, Vol.28, No.4, pp.415-421, 1996
 6) Park, K. S., Lee, A. J., Koh, B. K.: Driver's Characteristics in the Perception of a Lead Vehicle's Deceleration Level, *International Journal of Cognitive Ergonomics*, Vol.5, No.2, pp.125-136, 2001
 7) 四辻裕文、喜多秀行「ドライバーが抱く視覚的な距離・速度知覚構造のモデル化に関するレビューと展望」『IATSS Review』Vol.34、No.3(本号)、pp.326-333、2009年
 8) Gibson, J. J.: The Visual System; Environmental Information, In *The Senses Considered as Perceptual Systems*, pp.186-223, Houghton Mifflin, 1966
 9) Lee, D.N.: The Optic Flow Field; The Foundation of Vision, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B*, Vol.290, No.1038, pp.169-178, 1980
 10) Lee, D.N.: A Theory of Visual Control of Braking Based on Information about Time-to-collision, *Perception*, Vol.5, No.4, pp.437-459, 1976
 11) 交通工学研究会「運転における知覚と反応」『交通工学ハンドブック』、第2章2-6節、丸善、DVD-ROM、2008年