

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

四辻裕文*

喜多秀行**

距離や速度に対するドライバーの知覚には、個別の経験則が存在する。距離や速度の知覚エラーを防ぐ工学的な交通安全対策の効果分析には、それらの知覚構造を一つの理論的基盤の上で明示的にモデル化し、運転行動分析フレームに組み込む必要がある。このようなフレームを用いることで、距離や速度の知覚エラーを同時に回避するような交通安全対策が運転行動に及ぼす影響を工学的に分析できる。本稿では、距離や速度の知覚構造の理論的なモデル化に関して、Optic Flowによる視知覚に着目し、そのレビューを行う。知覚構造モデルをどの程度まで運転行動分析フレームに組み込むべきか、経験則では何が課題なのかについて考察し、Optic Flowによる知覚構造のモデル化の利点、不利点を指摘する。

A Perspective and Review for Modeling the Structure of Driver's Visual Perceptions for Distance and Speed

Hirofumi YOTSUTSUJI*

Hideyuki KITA**

Behind drivers' perceptions for distance and speed, each empirical rule exists. Considering the effects analysis of the engineered traffic safety measures to prevent drivers' perceptions for distance and speed from causing perceptual errors, it is necessary to make the perception structures for both of them explicitly modeled on a certain theoretical basis, and to incorporate the model into a driving behavior analysis framework. Employing such a framework, the influence of traffic safety measures to avoid the perceptual errors for distance and speed coincidentally on drivers' behaviors can be analyzed in the engineered manner. Considering the theoretical modeling of the perception structures for distance and speed, this paper focuses on each driver's visual perception through 'optic flow', and reviews the modeling of it. This paper examines how far the perception structure model should be incorporated into the framework, what the issues are on the use of empirical rules, and points out the advantages and disadvantages of the modeling of perception structures based on the optic flow.

1. はじめに

ドライバーは、先行車との車間距離や前方カーブまでの視認距離、自車の走行速度や先行車との相対

速度など、距離や速度に関する認識を走行中に頻繁に行っている。その際、距離標や速度計を見ていないならば、走行中の距離や速度の知覚量（距離感や速度感）は、実際の大きさと乖離する場合がある。本人が知らずにこのような乖離が発生するならば、乖離による知覚エラーは、たとえ運転中の状況判断や意思決定が合理的で、かつ運転操作にミスがなくても、結果的に不適切な距離感や速度感によって潜在的事故危険状態に陥るリスクを高めることになる。ドライバーがこのような潜在的事故危険状態にあ

* 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

る場合、この状態に陥ることを未然に回避し、安全な運転行動へと誘導するような予防安全対策が求められる。これまで、ドライバーが抱く距離感や速度感のモデル化には、各々に経験則が知られていたが、これらの知覚構造と運転行動の関係は、必ずしも明確でなかった。距離や速度の知覚エラーを前提とした工学的な予防安全対策の効果分析には、距離感や速度感のモデルを個別の経験則で扱うのではなく、これらの知覚構造を一つの理論的基盤の上でモデル化し、ドライバーの意志決定の合理性を仮定した運転行動分析フレームに組み込むことが有用である。これによって、距離や速度の知覚エラーを同時に回避する予防安全対策が運転行動に及ぼす影響を工学的に分析できる。その前提として、知覚構造のモデル化がどのような理論的基盤に立てば、運転行動分析フレームへの組み込み易さや従来の経験則との整合性から有用かを整理しておく必要があると考える。

一方、ドライバーは、運転に利用する知覚情報のほとんどを視覚から得ている¹⁾と言われている。ドライバーの視知覚 (visual perceptions) の研究では、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、視覚刺激の流動 (optic flow : 以下、OF*) から自己移動を知覚できることが知られている。この研究分野では、OFの理論的なモデル化に関していくつかのアプローチが提案されている。筆者らは、このOFに関する知覚理論が、ドライバーの距離知覚構造や速度知覚構造をモデル化する際の理論的基盤になると考えている。しかし、その前提として、OFによる知覚構造のモデル化というアプローチ自体が、運転行動分析フレームへの組み込み易さや、従来の経験則との整合性といった観点から見て、果たして有益であるかという点について検討しておく必要があると考える。

そこで本稿では、OFのモデル化に関する研究レビューを通じて、知覚構造モデルをどの程度まで運転行動分析フレームに組み込むべきか、また、経験則では何が課題なのかについて考察し、OFによる知覚構造のモデル化の利点・不利点を検討する (Fig.1)。

2. レビューの視座

2-1 運転行動分析フレームへの組み込み易さ

工学的な運転行動分析フレームに関して、喜多・前田は、効用アプローチに基づくモデル化の枠組みを提案している²⁾。この枠組みでは、ドライバーは、

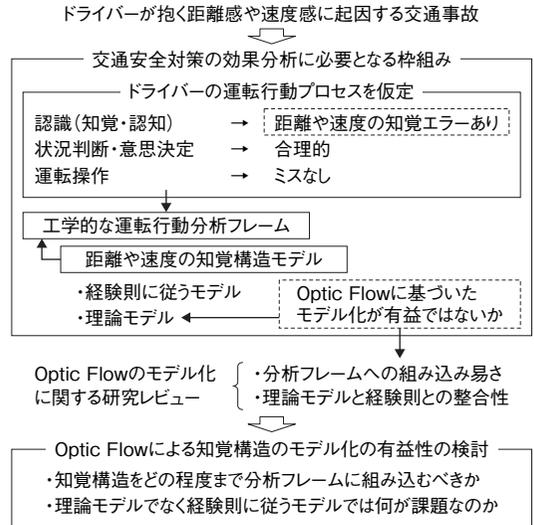


Fig. 1 本稿の目的

瞬間的な走行効用を抱きながら、効用最大となる運転挙動を時々刻々と選択すると考える。この枠組みには、今のところ、ドライバーの知覚構造が明示的に組み込まれていない。しかし、運転中の状況判断や意思決定が合理的で、かつ運転操作にミスがないドライバーの知覚エラーを工学的に分析したいならば、意思決定・運転操作レベルの分析モデルのモデル化には、この枠組みが有効と考える。

一方、視知覚プロセスをモデル化する際、視覚情報の検知 (detection) と認知 (cognition) を区別して考える必要がある。Gibsonによれば、視知覚とは、視環境に存在する情報を探索して検知することである^{3,4)}。Marrによれば、視覚情報の検知とは、純粋に幾何学的な網膜上の計算プロセスを意味し、視覚情報の認知とは、2次元網膜像を脳内で3次元空間に変換するアルゴリズムを意味する⁵⁾。

本稿では、OFの検知と認知を区別し、効用アプローチに基づく運転行動分析フレームへの組み込み易さの観点から、OFのモデル化に関する研究レビューを行い、知覚構造をどの程度まで運転行動分析フレームに組み込むべきかを考察する。

2-2 理論モデルと経験則との整合性

交通工学や交通心理学では、ドライバーが知覚す

* Optic Flowは、Optical Flowと呼ばれることがある。一般に、人間の網膜を対象とした場合Optic Flowが、疑似的な網膜を対象とした場合Optical Flowが使われる傾向にある。本稿では、明示的には両者を区別しないで、OFと略すことにする。

る車間距離と実際の車間距離の関係は対数関数で近似できることが知られている。また、ドライバーが知覚する走行速度と実速度の関係はベキ関数で近似できることが知られている。これまで、運転行動分析における距離感や速度感のモデルは、理論的にモデル化したものでなく、このような経験的にデータ適合の良い関数関係で表されることが多かった。

一方、距離や速度の知覚構造を理論的にモデル化したとしても、経験則と同じ関数関係が成り立つかは必ずしも明確でない。例えば、先行車が存在しない場合に知覚する距離と実距離の関係が対数関数で表されるか否かは必ずしも明確でない。この場合、距離知覚がoptical arrayを情報源とするならば、先行車が存在しない場合の距離知覚構造をOFによって理論的にモデル化できる可能性はある。距離や速度の知覚構造を理論的にモデル化した結果、仮に経験則と同じ構造になるならば、運転行動分析フレームの中で経験則に従う知覚構造モデルを用いても、その分析結果に理論的裏づけが与えられる。しかし、その前提として、OFによる知覚構造モデルが経験則と整合するのか整理しておく必要がある。

本稿では、OFによる知覚構造モデルと経験則との整合性を見るという観点から、OFのモデル化のレビューを行い、経験則では何が課題かを考察する。

3. Optic Flowのモデル化に関するレビュー

3-1 Optic Flowとは何か

ドライバーの中には、高速道路の直線区間を単独で走行中、ある速度以上かつ定常速度で運転したときに、まるで自分自身は静止しており、客観的には静止しているはずの道路や風景が進行方向とは逆向きに流動して見えることで、自分自身が移動しているという感覚を得た経験があるかもしれない。

Gibsonによれば、ドライバーは、路面上に存在するoptical arrayが提供する「肌理の密度勾配 (gradient of the density of texture)」という視覚情報をもとに奥行き距離を知覚できる^{3,4)}。さらに、Gibson³⁾、Lee⁶⁾によれば、走行中のドライバーは、視界の中の注視焦点から視野全体に拡大するOFをもとに、移動速度を知覚できる。この移動速度知覚からドライバーは移動感を抱くと言われており、これは、視覚誘導性の自己移動知覚 (visually induced self-motion perception)、またはvectionと呼ばれる^{7,8)}。OFとvectionの関係については、Lappe et al.による詳細なレビューが参考になる⁹⁾。

一方、OFは、vectionの手がかりの一つになるだけでなく、視覚的な予見情報として運転挙動にも影響を与える。実験心理学では、路面の肌理の密度勾配をrandom dotsで表現し、OFを除く他の手がかりを仮想的に排除した室内実験に基づく実証研究の蓄積がある。これらの研究によって、ドライバーは、OFの変化をもとにステアリングやブレーキングで障害物を回避できること、路面から知覚するOF (これをglobal OFと呼ぶ) と路面上を移動する対象 (例えば先行車) から知覚するOF (これをlocal OFと呼ぶ) を弁別できること、そして、global OF拡大率によって自己の移動速度の大きさを知覚できること¹⁰⁾、などが判明している。

3-2 Optic Flowの数理的な解釈

OFの数理的な解釈の研究も蓄積している。注視焦点から視野全体に拡大するOFは、視覚刺激の網膜投影像の時空間変化として、網膜上に瞬時の速度場を形成する。この速度場の数理的な解釈の仕方によって、OFのモデル化に関するアプローチは、以下に示す三つに整理できる。なお、以下では、特に断らない限り、global OFを対象とする。

一番目のアプローチでは、視覚刺激は輝度を持ち、その視覚刺激が時刻 t に平面状の網膜上の位置 (x, y) に投影された像も輝度 $E(x, y, t)$ をもつと考える。Horn & Schunckは、この $E(x, y, t)$ は、視覚刺激の観測者が移動しても時間的に変化せず、 $\partial E / \partial t = 0$ が仮定できるとして、網膜上の瞬時の速度場であるOFを、網膜上の輝度の勾配と解釈した¹¹⁾。このアプローチは、一般に、カメラ等の疑似網膜を対象とした画像パターン認識の研究で採用されることが多く、運転行動分析フレームに組み込むよりもむしろ、視覚刺激の検知に関する分析枠組みの中で別途扱ったほうが望ましいと考える。

二番目のアプローチでは、視覚刺激の像は眼の水晶体を介して平面状の網膜上に1対1で投影されるので、視覚刺激とその網膜像とを結んだ線は、注視焦点方向に対して視角 θ' をもつと考える。Leeは、この θ' は、視覚刺激の観測者の移動とともに時間的に変化するとして、網膜上の瞬時の速度場であるOFを、視角の微小時間変化 $d\theta' / dt$ と解釈した^{6,12)}。このアプローチによって、Leeは、前方の静止障害物との衝突余裕時間 (time-to-collision: 以下、TTC) を導出し、ブレーキングによる障害物回避挙動を分析している¹²⁾。Regan & Grayは、両眼視差を考慮したTTCを導出¹³⁾、あるいはKaiser & Mowafyは、

先行車に対する追い越し余裕時間(time-to-passage)を導出し¹⁴⁾、各々、ブレーキングによる回避挙動を分析している。また、Fajen & Warrenは、単眼でのTTCを導出し、ステアリングによる回避挙動を分析している¹⁵⁾。

三番目のアプローチでは、観測者の直進方向移動が網膜上の位置 (x, y) に視覚刺激を投影し、かつ観測者の回転方向移動が網膜自体を回転させると考える。Longuet-Higgins & Prazdnyは、網膜上の瞬時の速度場であるOFを、移動成分ベクトルと回転成分ベクトルの合成と解釈した¹⁶⁾。このアプローチは、視覚情報の検知と認知を含めた空間視を厳密にモデル化しようとする視覚心理学の研究で採用されることが多い^{5, 8)}。このアプローチでは、他の二つと違ってOFの回転成分を明示的に考慮するが、モデルが計6個の未知数をもつ方程式系となり、運動行動分析フレームに組み込むには複雑すぎる。

ここで、モデル化の前提条件を考える。OFの回転成分は、カーブ進入や車線変更など左右方向の運動挙動から影響を受ける。そこで、ステアリング挙動を無視し、直進するドライバーを想定するならば、OFの回転成分は無視できる。また、視覚刺激の像は、離れた両眼の網膜上に位置ずれをもって投影されるが、両眼軸中点に第三の眼「サイクロプスの眼」¹⁷⁾を仮定すれば、両眼視差を無視できる。

これらの前提に立てば、Leeが提案した単純なOFのモデル化の枠組みが、本稿における距離・速度知覚構造のモデル化には適すると考える。

3-3 単純なOptic Flowのモデル化の枠組み

ここで、Leeが提案した単純なOFのモデル化の枠組み(Fig.2)をレビューする^{6, 12)}。

Fig.2において、ドライバーはサイクロプスの眼をもち、ある注視焦点を見て眼の高さ H を一定としながら直進している。ドライバーは速度計を見ずに運転しており、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。ドライバーは視角 θ' の微小時間変化から、網膜像の速度 v'_o を知覚する。 v'_o と v_o は異なる。 v'_o 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。

ここで、視覚刺激として、前方 L' の路面上に静止する障害物を対象とする。すると、 v_o で接近する障

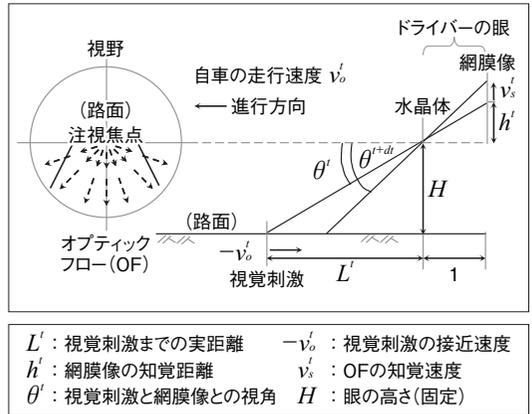


Fig. 2 単純なOptic Flowのモデル化の枠組み

害物に対するTTCは、視角 θ' の微小時間変化 $d\theta'/dt$ をもとに、以下のように導出される。

$$\theta' = \tan^{-1} H/L' \cong H/L' \dots\dots(1)$$

$$\frac{dL'/dt}{H} = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{\theta'} \right] \dots\dots(2)$$

$$\frac{v'_o}{H} = \frac{d\theta'/dt}{(\theta')^2} \dots\dots(3)$$

$$\frac{L'}{v'_o} = \frac{\theta'}{d\theta'/dt} \dots\dots(4)$$

式(4)より、TTCは $\theta'/d\theta'$ で表される。Leeは、この衝突危険性指標を、タウ(global Tau)と呼んだ。

Leeは、OFから導出したタウがブレーキングのタイミングを決めると考えた¹²⁾。しかし、ドライバーがOFから知覚するのは、時間でなく速度や距離であり、TTCは、速度感と距離感から得られる指標にすぎない。時間は知覚するものでなく、速度と距離で評価される認知の指標と考えるべきであろう。一方、交通工学では、TTCを追従車と先行車の速度差と車間距離から定義すると、先行車の速度が追従車よりも速い状態では計算できないとの指摘がある。この問題点を克服する衝突危険性指標として、PICUD (possibility index for collision with urgent deceleration)が提案されている¹⁸⁾。PICUDは、時間でなく速度と距離に着目した指標であり、先行車が急減速したときの追従車の潜在的な制動停止距離で定義される。

ところで、以上に示した定式化では、OFによる距離知覚構造と速度知覚構造が明示されない。そこで、同じ枠組みでLeeとは異なる定式化を試みる。

まず、知覚距離 h' 、ならびに実距離 L' と、視角 θ'

の微小時間変化 $d\theta'/dt$ の関係は、次式を満たす。

$$\frac{d\theta'}{dt} = \frac{d}{dt} \tan^{-1} h' = \frac{1}{1+(h')^2} \frac{dh'}{dt} \quad \dots\dots(5)$$

$$\frac{d\theta'}{dt} = \frac{d}{dt} \tan^{-1} \frac{H}{L'} = \frac{-H}{H^2+(L')^2} \frac{dL'}{dt} \quad \dots\dots(6)$$

式(5)(6)より、次式を得る。

$$dh' = -\frac{H}{(L')^2} dL' \quad \dots\dots(7)$$

$$h' = \frac{H}{L'} \quad \dots\dots(8)$$

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。そして、式(8)を式(7)に代入して両辺を積分すると、次式が求まる。次式は、式(4)に対応する。

$$\frac{L'}{|-v_o|} = \frac{h'}{|v_s|} \quad \dots\dots(9)$$

式(9)は、知覚距離と知覚速度から得られるTTCと実際のTTCが一致することを示す。式(9)によれば、式(8)において知覚距離 h' と実距離 L' が一致しない限り、知覚速度 v_s と接近速度 $|-v_o|$ には乖離が生じることがわかる。つまり、式(9)は、OFによる速度知覚構造の理論モデルとみなすことができる。

一方、Fajenは、OFと運転挙動の関係について、前方障害物の接近速度 $|-v_o|$ と、式(4)で定義されたタウ(global Tau) τ' を用いて、次式に示す減速度 D^{*1} のモデルを提案した¹⁹⁾。

$$D^{*1} = \frac{|-v_o|^2}{2L'} = \frac{v_o'}{2\tau'} \quad \dots\dots(10)$$

Fajenは、実験的にglobal OF変化率を速度 v_o のrandom dotsで与え、式(10)を用いて、ドライバーが $D^{*1} > D'$ と予見するならば減速度を増やし、 $D^{*1} < D'$ ならば減らすことを実証した。

式(9)(10)は、単純なOFのモデル化の枠組みに従った距離や速度の知覚構造モデルがもつ、運転挙動選択行動の分析フレームへの組み込み易さを示唆する。

3-4 距離知覚構造の理論モデルと経験則

式(7)(8)は、OFによる距離知覚構造の理論モデルを表す。式(7)は、例えば、遠方ビルの奥行き幅の視覚変化量がビルまでの距離の2乗に反比例して狭く見えることを意味する。また、式(7)は、実距離 L' のWeber比 dL'/L' が一定ならば、知覚距離 h' の変化量

dh' は距離のWeber比に比例せず、Fechnerの法則が成立しないことを意味する。このとき、式(8)より、 h' と L' の関係は反比例となる。

一方、交通工学では、先行車との車間距離知覚は、経験的にFechnerの法則に従う場合が多い。この経験則に従うならば、次式が成り立つ。

$$dh' = -\frac{H}{L'} dL' \quad \dots\dots(11)$$

$$h' = -H \ln L' \quad \dots\dots(12)$$

式(11)(12)は、経験則に従う車間距離知覚モデルである。式(12)より、 h' と L' の関係は対数減少となる。ここで、理論的なモデル化による式(7)と経験則による式(11)を比較すると、式(8)(12)が示すように、 h' と L' が反比例か対数減少かという点で違いがある。ここで、式(8)と式(12)の L' を比較する。 $H > h' > 0$ だから、 h' は、次式を満たす。式(13)は、式(12)の L' よりも式(8)の L' のほうが常に長いことを示す。

$$H/h' - \exp(-h'/H) > 0 \quad \dots\dots(13)$$

ところで、以上の議論では、先行車をあたかも路面上の1点のように扱っており、先行車の車高は無視している。Fig.2の枠組みで先行車の車高を考慮すると、車高の上端点にも視覚刺激が配置される。Fig.2では「眼の高さ H が一定」を前提条件としており、この前提で先行車の車高を考慮した場合の距離知覚構造のモデル化、あるいはそのモデルと車高を考慮した車間距離知覚の経験則との関係についての検討は未解決であり、今後の課題としたい。

ここで、理論モデルである式(7)と経験則に従う式(11)の相違点に関して論点を整理するため、以下で心理物理学(Psychophysics)の知見を整理する。今、距離の微小変化が弁別可能(differentiable)なとき、その最小距離を弁別距離と呼ぶ。そして、任意の距離とその弁別距離との比を、距離のWeber比と呼ぶ。このとき、距離が任意に変化しても距離のWeber比が常に一定ならば、知覚距離の変化量は距離のWeber比に比例するという経験則を、距離に関するFechnerの法則と呼ぶ。ある程度の車間距離についてはこの経験則が支持されて、知覚される車間距離と実際の車間距離は対数関係で表されることが知られている。つまり、車間距離が広がるにつれて「広い」という知覚量が逡減する。しかし、現実には、ある程度以上に車間距離が広がると知覚量は曖昧になる傾向がある。このとき、先行車が存在しないと

みなせるほどの距離に対しても、同様にFechnerの法則が成立するか否かは、必ずしも実証されていない。

ここでいうFechnerの法則は、19世紀の古典的な経験則である。Fechner自身も指摘しているように、Fechnerの法則は、Weber比が一定という仮定に課題があり、一般化が試みられてきた。ここでは、Norwich et al.を参考に、Fechnerの法則の一般化に関する知見を整理する²⁰⁾。

今、一般化されたFechnerの法則を、次式で表す。なお、便宜上、添字*t*の表記は省略する。

$$\frac{dh}{h^\alpha} = k \frac{dL}{L^\beta} \quad \dots\dots(14)$$

式(14)において、*h*と*L*の関係は、任意の*k*に対するパラメータ α, β に依存する。

初めに、 $\beta = 1$ と置く。Weber比*dL* / *L*は一定としよう。まず、 $\alpha = 0$ ならば、*dh*が一定となる。この*dh*が一定という結果こそがFechnerの法則の本質であり、それによって $h = c_1 \ln L + c_2 (c_1, c_2: \text{定数})$ という対数関係を得る。一方、 $\alpha = 1$ ならば、 $dh \propto h$ となり、Fechnerの法則が成立しない。これをEkmanの法則と呼ぶ。このとき、 $h = c_3 L^k (c_3, k: \text{定数})$ というべき関係を得る。*h*と*L*の関係が、実証的にべき関数で近似できるとき、*h*と*L*の関係はStevensの法則に従うという。

次に、 $\beta \neq 1$ と置く。Weber比*dL* / *L*は一定でなく $L^{1-\beta}$ に依存し、 dL / L^β が一定としよう。これをNear-miss-to-Weberの法則と呼ぶ²¹⁾。また、本稿では、 dL / L^β をニアミス型Weber比と呼ぶことにする。ここで、 $\alpha = 0$ ならば、ニアミス型Weber比*dL* / L^β が一定という仮定のもとで*dh*が一定となり、Fechnerの法則が成り立つ。しかし、Weber比*dL* / *L*が一定という仮定のもとではFechnerの法則は成立しない。このとき、 $h = c_4 L^{1-\beta} (c_4, \beta: \text{定数})$ というべき関係が成り立つ。つまり、Weber比がニアミス型の場合、*h*と*L*は対数関係でなくべき関係となる。ニアミス型Weber比については、McGill & Goldberg以来の研究蓄積があり、例えば純音の聴覚では従来のWeber比よりもニアミス型のほうがデータ適合度は高いとの報告がある²¹⁾。

以上の整理のもとで、先ほどの距離知覚構造モデルを再考する。すると、式(7)の理論モデルは、式(14)で $\beta = 2$ かつ $\alpha = 0$ とした場合なので、式(8)のように*h*と*L*の関係が反比例となる。また、経験則に従う

式(11)は、式(14)で $\beta = 1$ かつ $\alpha = 0$ とした場合なので、式(12)のように*h*と*L*の関係が対数減少となる。つまり、理論モデルと経験則に従うモデルの違いは、一般化されたFechnerの法則で、 $\beta = 2$ と $\beta = 1$ という構造上の違いに依ることがわかる。

このように、先行車が存在しない場合の距離知覚構造が経験則に従わないとする妥当性は、距離のWeber比がニアミス型で近似できるか否かに依存する。式(7)が理論的に導出されたという帰結は、先行車が存在しない場合の距離知覚に関して、ニアミス型Weber比の適合度が高いことを示唆する。

4. レビューで得た知見の考察

4-1 どの程度まで知覚構造を組み込むべきか

喜多・前田は、効用アプローチに基づく運転行動分析フレームを用いて高速道路オンランプ部の合流行動を分析した。その際、ドライバーは運転挙動に関して瞬間的な走行効用を抱くと仮定し、運転挙動の離散選択をモデル化している²⁾。ここで、ドライバーが選択するアクセレーションやブレーキングといった運転挙動が主観的な速度*v_s*の選択によって決まると考え、ドライバーは速度*v_s*に関して瞬間的な走行効用*U(v_s)*を抱くと仮定する。そして、ドライバーは時々刻々と効用最大となる速度*v_s^{*}* = arg max *U(v_s)*を選択していると仮定し、離散的な速度選択をモデル化することを考える。このような運転行動分析フレームを採用するならば、OFのモデル化から導出した式(9)の速度知覚構造モデルは、このフレームに非常に組み込み易い構造になるというメリットがあることがわかる。*U(v_s)*に基づく速度選択行動の分析フレームに式(9)を組み込むことで、*h*と*L*の不一致による*v_s*と*v_s^{*}*の知覚エラーを分析できる可能性がある。

一方、式(9)は、視知覚プロセスのうち、視覚情報の検知プロセスのみを扱っており、認知プロセスを捨象している。これは、OFのモデル化に際して本稿で採用したアプローチのデメリットと捉えられるかもしれない。しかし、著者らはMarrが指摘する視覚情報の認知プロセス⁵⁾は、速度選択行動の分析フレームに組み込むには過度に複雑過ぎると考えている。むしろ、運転行動分析フレームにおいて、網膜上のOF検知プロセスと脳内の効用最大化アルゴリズムは考慮するが、網膜から脳への認知プロセスはブラックボックスとして扱ったほうが、知覚構造を考慮した安全対策効果分析ツールの操作性の面から

見ると、工学的には有益であると考えられる。

認知プロセスをブラックボックスとして扱う場合の課題については、5章で言及する。

4-2 経験則に従うモデルでは何が課題なのか
式(7)(8)は、OFのモデル化に立脚する理論モデルであり、距離と速度の知覚エラーを表現する式(9)が導出可能というメリットがある。しかし、走行中の距離知覚に関してWeber比がニアミス型になるか否かは今のところ実証的に不明であり、式(7)(8)の経験的妥当性は必ずしも明確でないというデメリットがある。一方、経験則に従う式(11)(12)は、車間距離知覚に関して経験的妥当性が認められているというメリットがある。しかし、式(9)の速度知覚構造モデルとの関係が不明であるというデメリットがある。

したがって、OFのモデル化によって運転行動分析フレームに組み込みやすい速度知覚構造モデルが導出可能ではあるが、その導出過程で、距離知覚構造に関して理論モデルと経験則に従うモデルとが必ずしも整合しなくなる。これを打開するアプローチの一つとして、理論的な距離知覚構造モデルと経験則に従うモデルの両方を扱える形で、式(9)の速度知覚構造モデルを再構築することが考えられる。

距離知覚構造の経験則を内包した速度知覚構造のモデル化に関する課題については、5章で言及する。

5. 課題と展望

5-1 視覚情報の認知プロセスの取り扱い

先述したように、本稿では、網膜上の検知プロセスと脳内の効用最大化アルゴリズムを連結する部分のモデル化は捨象し、視覚情報を脳で認知するプロセスはブラックボックスとみなした。この場合、ブラックボックス内の不確実性を、入力側と出力側に反映する必要があるという課題が残る。

ブラックボックスの出力側である脳内の意思決定モデルで不確実性を扱う場合、効用アプローチの分析フレームに従えば、その取り扱いは容易である。さらに、このフレームに従えば、不確実性のみならず、希望速度といった参照点や、事故リスクに対する態度などを走行効用に反映することもできる。

一方、ブラックボックスの入力側である網膜上の検知プロセスで不確実性を扱う場合も考えられる。Marrが、視覚情報の検知は純粋に幾何学的な網膜上の計算プロセスであると考えたように⁵⁾、OFのモデル化は決定論的なアプローチをとる。しかし、例えば「眼が慣れる」といった生理的影響を受けて、

視知覚が時間的に変化することも考えられる。このような馴化(habituation)を考慮して、OFの決定論的モデルを拡張することも考えられる。

5-2 経験則を内包した知覚構造の理論モデル

本稿で見たように、ドライバーの距離知覚構造において、知覚距離と実距離の関係は、経験的には対数減少関数とみなせるのに対し、理論的には反比例関数となる。一方、速度知覚構造において、知覚速度と実速度の関係は、経験的にはベキ関数とみなせるのに対し、理論的にはどのような関数関係になるのか必ずしも明確でないという課題が残る。

しかし、距離知覚に関する式(7)(8)の理論モデルと、経験則に従う式(11)(12)との構造上の違いを内包した形でモデル化すると、速度知覚構造が理論的にもベキ関数になることを論理展開することは比較的容易である。この点は、別の機会に発表したい。

OFのモデル化によると、先行車が存在する場合と存在しない場合とで距離知覚構造のモデルが異なる。このとき、OFを理論的基盤としない別のアプローチに従い、距離知覚構造の統一的なモデル化を目指すべきとの意見もあろう。しかし、筆者らは、距離の取り扱う範囲によって知覚構造が異なってもよいと考えるし、距離や速度といった知覚要因ごとにその知覚構造は異なるべきであると考えられる。距離知覚構造の理論的・経験的な違いは必ずしも実証されていないことから、むしろ距離知覚構造の理論的・経験的な違いを内包した速度知覚構造のモデル化によって、そのモデルから距離知覚構造を実証できる枠組みを構築することを目指すべきと考える。

6. おわりに

一般に、交通事故は、ドライバーの運転行動プロセスのうち、知覚・認知レベルのエラー、状況判断・意思決定レベルの限定合理性や非合理性、運転操作レベルのミスが複合的に重なり合って生じるものと考えられる。複合的な要因が重なり合う事故に対する交通安全対策の効果を分析するには、運転行動プロセスのいずれかのレベルに着目し、そのレベルに対する効果を工学的に分析するというアプローチが有益である。著者らは、知覚レベルが運転行動プロセスの最も入力側に位置することから、まずは知覚レベルに着目することが肝要であると考えられる。

ドライバーの知覚エラーの存在を前提として、知覚構造を組み込んだ合理的ドライバーの運転行動分析フレームを構築した例は、筆者らの知る限りない。

本稿のレビューは、このフレーム構築の橋渡しとして、知覚構造のモデル化に役立つものとする。

参考文献

- 1) Sivak, M. : The Information that Drivers Use; Is it Indeed 90% Visual?, *Perception*, Vol.25, No.9, pp.1081-1089, 1996
- 2) 喜多秀行、前田信幸「道路交通における走行サービスの質とその計測：効用アプローチに基づく方法」『土木学会論文集』No.772 / IV-65、pp.3-10、2004年
- 3) Gibson, J. J. : The Visual System; Environmental Information, In *The Senses Considered as Perceptual Systems*, pp.186-223, Houghton Mifflin, 1966
- 4) 境敦史、曾我重司、小松英海「ギブソンの生活史と研究歴」『ギブソン心理学の核心』第1章、勁草書房、pp.17-50、2002年
- 5) Marr, D. : The Philosophy and the Approach, In *Vision; A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*, pp.8-40, New York: W. H. Freeman, 1982
- 6) 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
- 7) Berthoz, A., Pavard, B., Young, L. R. : Perception of Linear Horizontal Self-motion Induced by Peripheral Vision (Linear-vection) Basic Characteristics and Visual-vestibular Interactions, *Experimental Brain Research*, Vol.23, No.5, pp.471-489, 1975
- 8) 中溝幸夫、光藤宏行「空間視」塩入論編『視覚Ⅱ』第7章、朝倉書店、pp.158-182、2007年
- 9) Lappe, M., Bremmer, F., van den Berg, A. V. : Perception of Self-motion from Visual Flow, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.3, No.9, pp.329-336, 1999
- 10) Owen, D. H., Warren, R. : Perception and Control of Self-motion; Implications for Visual Stimulation of Vehicular Locomotion, In *Ergonomics and Human Factors; Recent Research*: Mark, L. S., Warm, J. S., Huston, R. L. (Eds.), New York: Springer-Verlag, pp.40-70, 1987
- 11) Horn, B. K. P., Schunck, B. G. : Determining Optical Flow, *Artificial Intelligence*, Vol.17, No.2, pp.185-203, 1981
- 12) 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
- 13) Regan, D., Gray, R. : Visually Guided Collision Avoidance and Collision Achievement, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.4, No.3, pp.99-107, 2000
- 14) Kaiser, M. K., Mowafy, L. : Optical Specification of Time-to-passage; Observers' Sensitivity to Global Tau, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, Vol.19, No.5, pp.1028-1040, 1993
- 15) Fajen, B. R., Warren, W. H. : Behavioral Dynamics of Steering, Obstacle Avoidance, and Route Selection, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, Vol.29, No. 2, pp.343-362, 2003
- 16) Longuet-Higgins, H. C., Prazdny, K. : The Interpretation of a Moving Retinal Image, *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, Vol.208, No.1173, pp.385-397, 1980
- 17) 中溝幸夫、田谷修一郎「3次元空間の知覚」菊地正編『感覚知覚心理学』第6章、朝倉書店、pp.93-114、2008年
- 18) Bin, M., Uno, N., Iida, Y. : A Study of Lane-changing Behavior Model at Weaving Section Considering Conflicts, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.5, pp.2039-2052, 2003
- 19) Fajen, B. R. : Calibration, Information, and Control Strategies for Braking to Avoid a Collision, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, Vol.31, No.3, pp.480-501, 2005
- 20) Norwich, K. H., Wong, W. : Unification of Psychophysical Phenomena; The Complete Form of Fechner's Law, *Perception & Psychophysics*, Vol.59, No.6, pp.929-940, 1997
- 21) McGill, W. J., Goldberg, J. P. : A Study of the Near-miss Involving Weber's Law and Pure-tone Intensity Discrimination, *Perception & Psychophysics*, Vol.4, No.2, pp.105-109, 1968