

Time-To-Collision はブレーキ操作タイミングを決定するか

森田和元*1 大野督史*2 関根道昭*3

*1,*3 (独)交通安全環境研究所

*2 電気通信大学

追従走行時に追突事故被害を低減したり、運転操作負担を軽減しようとする各種の技術が導入されている。しかし、車両側からの自動ブレーキ操作のタイミングがドライバーの考えるタイミングと一致していない場合には、ドライバーに対して違和感を与えることとなる。そこで、後続車両のドライバーがどのような情報を基にしてブレーキ操作開始の判断を行っているのかについて、室内実験の走行データを基にして検討した。判別分析を行い寄与度の大きい要因を解析した結果、従来からいわれている Time-To-Collision ではなく、視角の変化率がブレーキタイミングの判断に大きく関係していることを明らかにした。

Can Time-To-Collision Decide the Braking Timing of the Driver?

Kazumoto Morita*1 Tokushi Ohno*2 Michiaki Sekine*3

*1,*3 National Traffic Safety and Environment Laboratory

*2 University of Electro-Communications

In recent years, various new technologies to keep the distance to the lead vehicle have been introduced to prevent rear-end collisions or to improve maneuvering easiness. However, when the timing of automatic braking on the vehicle does not coincide with the driver's timing judgment, he/she may feel uncomfortable. This paper examines which factor would mostly affect the driver's judgment of braking timing by conducting indoor experiments using 12 participants. Various factors such as vehicle velocity, distance between two vehicles, relative velocity, time-to-collision (TTC), rate of change of visual angle and others were examined by discriminant analysis. We revealed that the rate of change of visual angle, which is the inverse of TTC, is mostly related to the driver's judgment of braking timing instead of TTC which is popularly believed to have the important effect.

Keywords: Safety, Driver, Time-To-Collision, ACC, Discriminant Analysis

1. はじめに

最近、ドライバーにとって安全性を向上させるだけでなく、運転の容易さ、快適性を高めるための各種 ITS 技術の導入が進んできている。このうち、ブレーキ操作に関連するものとして、先行車両追従時の衝突軽減ブレーキやアダプティブ・クルーズ・コントロール (ACC) などがあり、これらの技術は車両加減速の制御のみであるので実現が容易であり広く実用化が進んでいる。

これらの技術に関して、車両側から自動的にブレーキ操作を行う場合、あるいは、警報を与える場合に、ドライバーの考えるタイミングと一致していない場合には、ドライバーに違和感を与えるおそれがある。そこで、先行車両の減速時にどのように後続車両のドライバーがブレーキ操作のタイミングを判断しているのかについて検討することが基礎的な知見として必要とされている⁽¹⁾。

この判断の指標としては、先行車両との車間距離

を相対速度で除した TTC(Time-To-Collision)が使用されることがある。しかし、相対速度が小さい場合には車間距離が短いにもかかわらず非常に大きな TTC の値をとることがあり、ドライバの行動を表現するのに必ずしも適切な指標ではないという批判がある(2,3,4)。

ちなみにこのような追従走行時の問題についてはこれまでも多くの報告がある。たとえば、追従走行時には、相対速度を重視して運転操作を行うという報告(5)がある。また、大型トラックのドライバに関して、操縦性を重視するドライバは車間距離による制御を行い、燃費を重視するドライバは相対速度を基にして制御を行っているという報告(6)がある。また、ブレーキ操作後の各時点において、重要視する指標が異なるという報告(7)もある。しかし、今までのところ、ドライバがどのような情報によりブレーキ操作を行うのかについての定説がない。

今回は、このような問題意識の基に、室内における運転シミュレータを用いて実験を行い、先行車両減速時に後続車両ドライバがどのような指標によりブレーキ操作のタイミングを決定しているのかを推定することとした。

2. 各種指標の考え方

TTC については、前述のように、車間距離を相対速度で除した値であって、同一相対速度が継続した場合の先行車両へ衝突するまでの時間を表すものであり(8)、安全性に直接関係する指標と考えられる。しかし、ドライバが前方の状況を見ながら予測する場合に、時間という指標が直接にドライバの感覚と合うものであろうかという疑問がある。それよりも、先行車両まで「近い」「遠い」という車間距離の方がより知覚しやすいともいえる。また、車間距離の感覚については、実際には先行車両までの距離ではなく、車両の大きさのほうの方がより知覚しやすいともいえる。

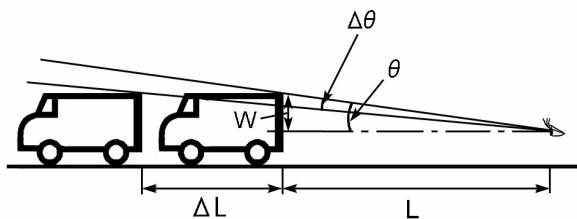


図1 車両運動と視角変化

この大きさの変化に着目した指標として、オプティックフローという考え方(9)がある。図1に示すように、先行対象物に張った視角変化を知覚するという考え方であり、視角が十分に小さいという前提の基に式で表すと、

$$\theta = \frac{W}{L} \quad \dots(1)$$

となる。ここで、 θ は視角、 W は先行対象物の幅または高さ等の大きさ、 L は先行対象物までの距離(一般的には車間距離)である。なお、図では視線方向より上部のみに関して図示しているが、とくに本質的な問題はない。

この式について時間による微分を施すと、

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{W}{L} \right) = -\frac{W}{L^2} \frac{dL}{dt} = -\frac{W}{L^2} * V_r \quad \dots(2)$$

となり、この値をオプティックフローという(9)。ここで、 V_r は車間距離の時間による微分であり相対速度を表す。この $d\theta/dt$ の単位については、ミリラジアン/秒(mr/s)で表されることが多い。

ただし、このオプティックフローの考え方では、 θ の変化のみを考慮しており、もともとの先行対象物の大きさを考慮していない。ドライバは、先行車両の大きさの増加率を知覚しているとも考えられる。この場合には、

$$\frac{1}{dt} \left(\frac{d\theta}{\theta} \right) \quad (\equiv DR) \quad \dots(3)$$

が関係していることとなる。ここでは、この値を Dilating Rate (DR) とよぶこととする。

ただし、これらの視角の変化をドライバが容易に知覚できるとしても、車両側からこの値を直接推定することは困難である。車両側から測定可能なものは、車間距離や速度である。この点についてさらに検討を加えると以下ようになる。

図1から、 $\Delta\theta$ が十分に小さいと考えれば、 $\Delta\theta/\theta$ は $\Delta L/L$ で近似される。このことより、

$$\begin{aligned} DR &= \frac{1}{dt} \left(\frac{d\theta}{\theta} \right) = -\frac{1}{dt} \left(\frac{dL}{L} \right) = -\frac{1}{L} \left(\frac{dL}{dt} \right) \\ &= -\frac{d}{dt} (\ln L) \quad \dots(4) \end{aligned}$$

となる。ここで、 L の増加にともない θ は減少することに注意。

式(4)から理解されるように、DR の値は車間距離

の対数を時間により微分した値となる。この車間距離の対数の変化というのはドライバにとって知覚しにくい値であると考えられるかもしれないが、実際はそうではない。ドライバが前方を知覚するとき、同じ1mの変化であっても、10m先の1mの変化と100m先の1mの変化は等しいとは考えない。むしろ、100m先であれば10mの変化を等しいと考えるというものであり、ヒトは物理量の対数によって知覚するというのがこの考え方の基礎となっている。

このDRの値については、車間距離の対数の時間的な変化を表すものであることが明らかにされたが、TTCとの関係では、

$$TTC = \frac{L}{V_r} = \frac{L}{\left(\frac{dL}{dt}\right)} = -\frac{1}{DR} \quad \dots(5)$$

となる。すなわち、TTCはDRの逆数である(8)。

以下、このような指標がドライバのブレーキ操作のタイミング決定に関係しているかどうかを実験的に検証する。

3. 実験内容

3.1 実験概要

室内において定置型の運転シミュレータを用いて実験を行った。先行車両の走行速度として、40km/h、70km/hおよび100km/hの3種類を実験条件として設定し、被験者に対して、車間時間が2秒となるように追従走行させた。この際、隣の車線に車間時間が2秒となる位置に車両を一台走行させて、その車両と併走することにより、設定した車間時間、車間距離が確保されるようにした。ここで、車間時間とは車間距離を後続車両の自車速度により除した値である。

先行車両の減速度として、1m/s²、2 m/s²、3 m/s²及び4 m/s²の4種類を設定した。1 m/s²の減速度については、すぐに気がつくのは困難なくらいの緩減速であり、4 m/s²の減速度であっても急ブレーキという感じではない。

先行車両の減速開始のタイミングは実験実施者が決定しており、追従走行が定常状態になったときに任意のタイミングで先行車両を減速させるようにした。この際、先行車両のストップランプを点灯させる場合と、点灯させないまま減速させるという2種類の条件を設定した。これは、緩減速の場合にもストップランプを点灯させると、後続車両のドライバにとって違和感があるという意見がある⁽¹⁰⁾ため

ある。

被験者に対して、先行車両の減速にあわせて追突しないように車両を停車させるように指示をした。この場合、どのような減速度でブレーキ操作を行うかは被験者の自由にさせた。被験者については、今回は65歳以上の高齢者12名(平均年齢68.0歳、標準偏差2.9歳)を用い、実験回数については、ストップランプ点灯の有無で走行速度3種類、減速度4種類を各1回ずつ繰り返したので、被験者一人当たり24回の実験となった。

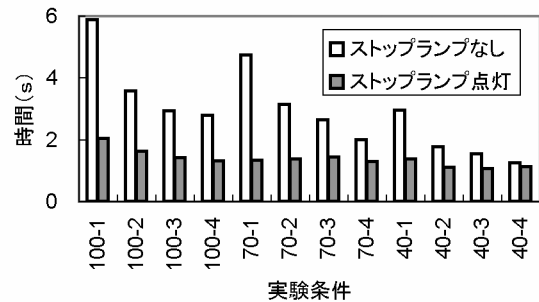


図2 先行車両減速時からブレーキを踏むまでの時間 (横軸の数値は、「時速km/h-減速度m/s²」を示す)

3.2 実験結果

先行車両の減速開始時から、後続車両ドライバがブレーキペダルを踏むまでの時間を図2に示す。先行車両がストップランプを点灯するかどうかで、ブレーキを踏むまでの時間が大きく異なることがわかる。ここで注意することは、先行車両が減速したとしても、直ちにブレーキ操作を行うようには指示をしていないため、緩減速のときのストップランプ非点灯の場合には、ブレーキを踏むまでの時間が長くなっている。

先行車両のストップランプを点灯させたときは、後続車両の被験者はその点灯タイミングにあわせてブレーキ操作を行うことが認められた(ブレーキペダルを踏むまでの時間は約1.1秒~2.0秒の範囲)。いっぽう、ストップランプが点灯しないときのデータについては、一般にブレーキを踏むまでの時間が長くなり、5.9秒(速度100km/hで1m/s²の減速度の時)の長さの場合もあった。ブレーキを踏むまでの時間は、先行車両の減速度が高くなるにつれて短くなっており、ドライバは先行車両の減速を判断しながら余裕をもってブレーキ操作を行っていたと考えられる。

ここで、本研究の目的は、ブレーキ操作タイミン

グに關係する要因は何であるのかを求めることであるので、ストップランプが点灯しない場合のデータを基にして以下の解析を行う。

4. 解析内容

4.1 主要な指標の探索

計測データに関しては、運転シミュレータによって記録された後続車両の自車位置、自車速度、自車加速度、先行車両位置、先行車両速度、先行車両加速度等がある。これらのデータから被験者のブレーキ操作のタイミングに關係する指標を考察する。

今回の対象にした項目は下記の9種類である。

- (1)車間距離(m)
- (2)相対速度(m/s) (車間距離の時間による微分)
- (3)相対加速度(m/s²) (相対速度の時間による微分)
- (4)自車速度(m/s)
- (5)車間時間(s) (車間距離を自車速度で除した値)
- (6)TTC(s)
- (7)車間距離の対数
- (8)オブティクフロー(mr/s)
- (9)DR (1/s)

これらの項目について、ブレーキペダルを踏んだ時点を0として、その-2.0秒から+0.5秒までの0.5秒間ごとの値を全被験者について求めた。

ここで、ブレーキ踏み替え時間が一般に0.3秒程度であること⁽¹¹⁾を考慮して、被験者は実際にブレーキを踏む0.5秒前の時点においてはブレーキを踏むべきであるという判断をしており、いっぽう、2.0秒前の時点ではいまだその判断を行っていないものと仮定する。

この仮定の下に、上記の9種類の計測項目を説明変数として、ブレーキ操作を開始するかどうかの判断を目的変数として解析を行った。すなわち、2種類の判断の違い(-0.5秒時点ではブレーキを踏むという判断、-2.0秒時点ではいまだブレーキを踏まないという判断)を9種類の計測項目により判別可能かどうかを調べた。実際の解析にあたっては、手動により変数選択の可能な判別分析を行い⁽¹²⁾、F比(分散比)の大小によって影響の大きい項目を選択した。

結果は、表1～表4に示すとおりである。各表にはF比と判別係数が記載されている。F比は説明変数を判別関数に取り入れることの統計的有意性を表すものであり、判別係数は判別関数を構成する際の各説明変数の係数となる。表1はどの変数も選択していないときであり、この場合にはDRが最も大き

いF比をとるので、このDRを最初に選択する。DRを選択すると(表2)、車間距離が2番目に大きなF比をとるので次にこれを選択(表3)、さらにF比に従って相対速度の項目を選択する(表4)。

ここで注意すべきは誤判別率であり、DRのみを選択した場合においても11.3%の誤判別率であり、変数を増やしたとしても10.0%、9.8%と大きく変化しない。逆に言えば、DRの変数のみにおいて、被験者の-0.5秒の判断と-2.0秒の判断とが約90%の確率で判別可能であるといえる。なお、オブティクフローについては、DRと関係しているので、DRを選択するとそのF比は顕著に低下することがわかる(表2)。

以上のことより、DRが被験者のブレーキ操作タイミングを決定するのに大きな役割を果たしていると考えられる。このことをより正確に表現すれば、DRを用いた線形判別式の結果により、ブレーキを踏むかどうかの判断に關する2群の判別を行うことが可能になるということである。

表1 判別分析結果(変数を選択していない場合)

説明変数	F比	判別係数
定数		
車間距離	11.467	
相対速度	182.444	
相対加速度	36.249	
自車速度	0.003	
車間時間	47.232	
TTC	0.482	
車間距離対数	8.472	
オブティクフロー	259.051	
DR	426.057	

表2 DRの変数を選択した場合(誤判別率11.3%)

説明変数	F比	判別係数
定数		-5.214
車間距離	23.454	
相対速度	6.222	
相対加速度	1.989	
自車速度	18.182	
車間時間	0.174	
TTC	0.443	
車間距離対数	20.535	
オブティクフロー	2.984	
DR	426.057	57.065

表3 DRと車間距離を選択した場合
(誤判別率 10.0%)

説明変数	F比	判別係数
定数		-2.822
車間距離	23.454	-0.073
相対速度	4.451	
相対加速度	0.064	
自車速度	0.093	
車間時間	0.031	
TTC	0.186	
車間距離対数	1.371	
オブティクフロー	3.848	
DR	453.357	61.371

表4 DRと車間距離、相対速度を選択した場合
(誤判別率 9.8%)

説明変数	F比	判別係数
定数		-1.433
車間距離	21.520	-0.115
相対速度	4.451	-0.519
相対加速度	0.396	
自車速度	0.013	
車間時間	0.133	
TTC	0.070	
車間距離対数	0.711	
オブティクフロー	0.119	
DR	25.135	44.598

ここで、TTCのみを選択した場合には誤判別率は50.0%の大きな値をとったので、TTCのみによってブレーキ操作タイミングを判断しているとはいえないという結果となった。つまり、線形判別式を前提とした場合には、TTCについては、その値そのものではなくて、その逆数の値が関係していると考えられる。

4.2 ドライバのブレーキ操作判断の推定

上記のようにDRの一変数のみで十分な判別が行うことが可能であることがわかったので、DRの変数のみに基づいて判別式を求めると、表2から、

$$y = -5.214 + 57.065 * DR \dots (6)$$

となる。各時刻のDRの値を式(6)に代入して、式の値が正になれば、ブレーキ操作を行うと判断していると解釈する。

全被験者の-2.0秒から+0.5秒までの0.5秒毎の

DRを基にしてこの式により計算を行い、各時点において正の値をとる件数を数える。この結果により、ブレーキ操作を開始すると判断する割合を-2.0秒から+0.5秒までの各時点で求めると図3となる。横軸の0以前の時点では、実際にはブレーキペダルを踏んではいないが、判別式の結果からは、時刻0に近づくにつれて、ブレーキペダルを踏むと判断する割合が徐々に増加していることがわかる。このことは、一人の被験者を考えてみれば、この割合がある閾値を超えた場合に実際にペダル操作を開始していると解釈することができる。

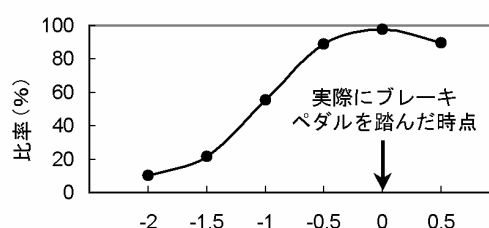


図3 判別式によるブレーキ操作開始判断の比率

ここで、今回の結論は高齢被験者の結果によるものであるため高齢者特有の結果となっている可能性がある。この点について、若年被験者14名(平均年齢32.7歳)についても実験を行ったところ、ほぼ同様の結果が得られ、DRの変数のみで9.5%の誤判別率で判別することが可能であった。従って、DRがブレーキ操作タイミングに大きく関与しているということは、高齢者特有の現象ではないと考えられる。このときの若年者の判別式は下記であった。

$$y = -5.349 + 77.645 * DR \dots (7)$$

5. まとめ

追従走行時における後続車両のドライバがどのような指標を基にしてブレーキ操作のタイミングを決定しているのかについて検討を行った。その結果、先行車両の大きさの変化率(車間距離の対数の微分値に等しい、または、TTCの逆数に等しい)による線形判別式により、ブレーキ操作タイミングの判別が可能であることがわかった。TTCそのものから判断することは困難であるという結論となった。

ここで、今回の評価実験は室内における運転シミュレータを用いて行っているため、実際の走行時のブレーキ操作タイミングの判断とは異なる可能性がある。この点について、今後、屋外における走行実験により検証していく予定である。

なお、今回の実験は通常走行時における実験であるので、衝突直前の緊急時のブレーキ操作の判断は別の要因により行っている可能性がある。

謝辞

本研究の内容は、文部科学省科学技術振興調整費による重要課題解決型プロジェクト「状況・意図理解によるリスクの発見と回避」の一環として行われたものである。記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 小島真一,本郷武朗,内山祐司,白木伸征: 先行車減速に対する能動的減速と受動的減速のタイミングについて, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.97-02, pp.5-8 (2002)
- [2] Michiel. M. Minderhoud, Piet. H. L. Bovy: Extended time-to collision measures for road traffic safety assessment, *Accident Analysis & Prevention*, 33, pp.89-97 (2001)
- [3] 鈴木宏典: 追従安全性評価手法の提案－TTCとの比較検討－, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.113-04, pp.17-20 (2004)
- [4] James R. Tresilian: Visually timed action: time-out for 'tau', *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.3, No.8, pp.301-310 (1999)
- [5] 成波,谷口哲夫,波多野忠,松島和男: 追従走行時のドライバの運転動作特性の解析, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.67-03, pp.19-24 (2003)

[6] 岩城亮,金子哲也,景山一郎: 大型車ドライバの追従制御特性解析に関する研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.92-03, pp.7-10 (2003)

[7] Toshiya Hirose, Toichi Sawada, Yasuhei Oguchi: Basic study on tailormade braking support system, *IATSS Research*, Vol.28, No.2, pp.68-75 (2004)

[8] David N Lee: A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision, *Perception*, Vol.5, pp.437-459 (1976)

[9] Mark. A. Brackstone, Beshr. Sultan, Michael.McDonald: Findings on the Approach Process Between Vehicles, *Transportation Research Record* 1724, paper No. 00-0831, pp.21-28 (2000)

[10] 関根道昭,森田和元,成波,岡田竹雄,益子仁一: 補助ブレーキ等の作動に伴う制動灯の自動点灯条件に関する基礎調査,交通安全環境研究所発表会概要集, pp.139-142 (2004)

[11] 森田和元,益子仁一,岡田竹雄: 自動車の車室内表示装置を注視することによる反応時間の遅れについて, *照明学会誌*, Vol.82, No.2, pp.121-130 (1998)

[12] (株)日本科学技術研修所編: JUSE-MA による多変量解析, 日科技連出版社, pp.127-144 (1997)