

信号情報を用いたドライバの判断支援システムの 呈示手法による影響

日大生産工(院) ○小林 浩之 日大生産工 丸茂 喜高

1. まえがき

近年、衝突被害軽減ブレーキに代表されるように、交通事故を未然に防ぐ予防安全技術の普及等により、交通事故発生件数や交通事故死傷者数は減少傾向にある。しかし、平成27年中における交通人身事故件数は約54万件にのぼり、依然として高い水準にある。これを道路形状別にみると、交差点およびその付近における事故件数の割合は54%となっており、半数近くを占めている。中でも、信号機が設置されている交差点においても16%の交通事故が発生している。

この一因として考えられるのが、ジレンマゾーンと呼ばれる領域において、ドライバが黄信号に遭遇した際の判断の迷いが挙げられる^{2)~3)}。ジレンマゾーンとは、停止するには停止線までに制動する十分な距離がなく、交差側の信号が青信号になる（全赤終了）までに交差点出口側を通過するには距離が長い領域のことである。この領域は、ドライバが交差点を通過するか停止するか判断が難しい領域である。

このジレンマゾーンに入り込まないように、高度化光ビーコン⁴⁾などの路車間通信技術を利用して、前方交差点の信号情報を取得する手法が挙げられる。取得した情報を車載表示器に呈示することで、ドライバへ早めの減速を促したり、速度維持を指示し、交差点を無停止で通過できるように走行支援があり、商品化もされている。しかし、走行支援のための情報呈示を、車載表示器などを用いてドライバへ知らせる際に、速度変化などにより状況が変わる場合には、通過の可能性も時々刻々変化するため、表示器に注意を向ける必要がある。そのため、ドライバが表示器に注意を向け続けていると、意図せぬ先行車の急制動に対して、追突など思わぬ事故の要因になりかねない。

この課題に対し、通過・停止の判断のための情報を道路上へ視覚的に呈示する支援システムを提案し、ドライビングシミュレータ実験（以下、DS実験）において有効性を確認した⁵⁾。しかし、提案した呈示手法と従来の呈示手法との比較は行われておらず、提案した支援システムの優位性が取れていない。そこで本研究では、先行車が急制動する場面において、提案した路面へ情報呈示を行う手法（以下、路面呈示）と、従来の車載表示器による呈示（以下、車載呈示）を想定したものと比較し、支援システムの呈示手法によるドライ

バの運転行動への影響について、DS実験により検討することを目的とする。

2. 評価に用いる指標

本研究において、前方の交差点の信号情報は、路車間通信技術などを用いて、事前に取得していることを想定している。この信号情報を活用して、ドライバの通過・停止の判断の支援を行うものとする。

2.1 路面呈示で用いる評価指標

通過（GO）の判断を支援する評価指標として、進入可能距離および通過可能距離を用いる。

進入可能距離 $d_e(t)$ は、現在の速度を維持した場合に、赤信号になる（黄信号終了）までに交差点へ進入（入口側停止線を通過）可能な距離である。これは、現在の速度 $v(t)$ と、信号が赤になるまでの時間TTR（Time To Red）を用いて、次式より算出される。

$$d_e(t) = v(t) \cdot TTR \quad (1)$$

次に、通過可能距離 $d_p(t)$ は、現在の速度を維持した場合に、全赤終了（交差側信号青現示）時までに交差点の出口側の停止線（対向車線側）を通過可能な距離である。これは、現在の速度 $v(t)$ と、交差側の信号が青になる（全赤終了）までの時間TTG_c（Time To Green cross）を用いて、次式より算出される。

$$d_p(t) = v(t) \cdot TTG_c \quad (2)$$

ただし、通過可能距離は出口側停止線を基準とするが、道路上に呈示する際には、交差点内には呈示せず、交差点長 l を引いた距離を、入口側停止線から呈示するものとする。以上の進入可能距離と通過可能距離は、走行速度や交差点長により変化する。例えば、走行速度が増加すると、全赤終了までに出口側停止線を通過は可能であるが、黄信号終了までに進入が不可能な場合がある。この場合、入口側停止線からの距離は、通過可能距離の方が長く、進入可能距離の方が短い。よって、いずれか短い方の距離を呈示することで、進入も通過も可能なことを知らせる。

Effects of Indicating Method for Driver's Judgement Assistance System Using Signal Information

Hiroyuki KOBAYASHI and Yoshitaka MARUMO

停止 (NOGO) の判断を支援する評価指標として、空走距離と制動距離を合わせた、停止距離を用いる。停止距離 $d_s(t)$ は、現在の速度から、予め想定した通常の減速度 (想定減速度) で停止線に停止可能な距離である。これは、現在の速度 $v(t)$ と反応時間 T 、想定減速度 a_a (ただし、 $a_a < 0$) を用いて、次式より算出される。

$$d_s(t) = v(t) \cdot T + \frac{v^2(t)}{2(-a_a)} \quad (3)$$

2.2 路面呈示による呈示方法

前節の評価指標を道路上へ視覚的に呈示する手法の模式図を図1に示す。図1(a)は、進入・通過いずれも可能な場合であり、自車の位置がGO指標の距離内にあれば (呈示された緑色の上に自車が乗っていれば)、現在の速度を維持することで交差点に進入・通過可能である。一方、その距離に達していない場合には、進入・通過のうち少なくともいずれかが不可であり、図1(b)のように GO指標とあわせてNOGO指標を重畳させることで、停止距離に達するまでにブレーキ操作を行い、緩やかな減速度で停止することが可能となる。

なお、本研究における呈示手法を実車へ適用する際には、AR (Augmented Reality) 技術により、HUD (Head-Up Display) を用いて、車両のフロントガラスなどへ投影することで、道路上へ視覚的に呈示されているかのように見えるインターフェースを用いた支援を行うことを想定している。

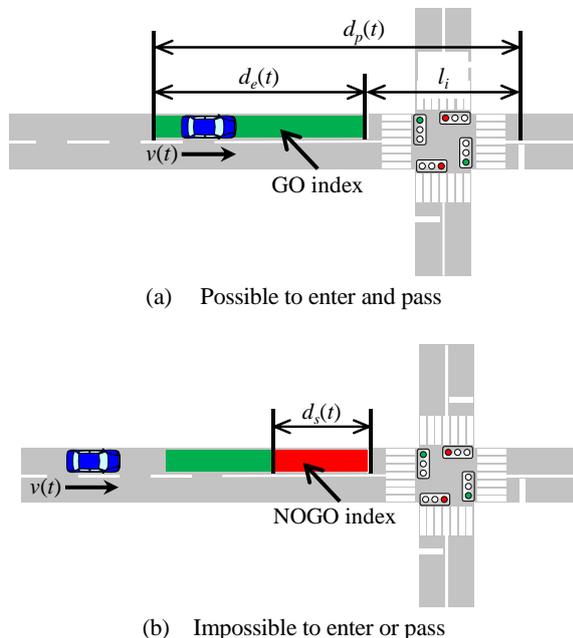


Fig. 1 Schematic diagram of indicating indices

2.3 車載表示器による呈示で用いる評価指標

信号切り替わり時における運転リスク評価指標⁶⁾について、以下に記す。

進入余裕度 (MTE:Margin To Enter) は、黄信号中に現在の速度のまま、交差点入口側停止線を通過可能

かどうかを表す指標であり、入口側停止線までの距離 $d(t)$ と現在の速度 $v(t)$ 、信号が赤になるまでの時間TTR (Time To Red) を用いて、次式より算出される。

$$MTE = \frac{v(t) \cdot TTR}{d(t)} \quad (4)$$

このMTEが1未満の状態では、速度が変わらなければ、赤信号になるまでに交差点に進入することができないことを表している。

通過余裕度 (MTP:Margin To Pass) は、全赤信号中に交差点を通過し終えるかどうかを表す指標であり、入口側停止線までの距離 $d(t)$ と交差点長 l_i 、現在の速度 $v(t)$ 、交差点の信号が青になる (全赤終了) までの時間TTGc (Time To Green Cross) を用いて、次式より算出される。

$$MTP = \frac{v(t) \cdot TTGc}{d(t) + l_i} \quad (5)$$

このMTPが1未満の状態では、速度を維持すると、全赤が終了するまでに交差点を通過できない。

停止余裕度 (MTS:Margin To Stop) は、停止線に対して想定した減速度で停止可能かどうかを表す指標であり、現在の速度 $v(t)$ 、想定減速度 a_a (ただし、 $a_a < 0$) 及び現在の車両位置から入口側停止線までの距離 $d(t)$ を用いて、次式で算出される。

$$MTS = \frac{d(t)}{v^2(t)/2(-a_a)} \quad (6)$$

このMTSが1未満の状態では、停止線手前で停止するためには、想定減速度以上の減速が必要となる。

2.4 車載表示器による呈示手法

車載呈示では、信号切り替わり時における運転リスク評価指標を図2のように呈示する。これは、MTEとMTPのうち、小さい方の値に応じて、下方向へバーの長さが変化する表示形態である。バーの色は緑と赤の2色とし、色を変化させる目安として、減速開始タイミングを空走時間分考慮して、早めるマージンである ΔM を使用する。 ΔM は次式により算出される。

$$\Delta M = \frac{2(-a_a) \cdot T}{v(t)} \quad (7)$$

ここで、式中の a_a (ただし、 $a_a < 0$) および T は、本実験ではそれぞれ、 -3.0m/s^2 、 0.75s を用いる。

呈示されるMTEまたはMTPの値の範囲は、0から2とした。MTEおよびMTPの値が1 (中立値) 以上の場合には、そのままの速度を維持することで、黄信号中に交差点へ進入し、全赤終了までに交差点を通過可能で

あり、緑色でバーが表示される。MTEとMTPのいずれか（または両方）の値が1未満であっても、MTSの値が $1+\Delta M$ を超える場合には、想定する減速度以下で停止する余裕があるため、直ちに減速をする必要はなく、緑色のバーが表示される。しかし、MTEとMTPのいずれか（または両方）の値が1未満かつ、MTSの値が $1+\Delta M$ 以下の場合には、直ちに減速を開始しなければ、通常の減速度以上の急停止となる状況であり、バーが赤色で表示され、ドライバに減速を促すものとする。

3. ドライビングシミュレータ実験

3.1 実験方法

提案する路面呈示による手法と、既存の運転支援システムで用いられている車載呈示の2つを比較することで、提案する支援システムとのドライバへの運転行動の影響について確認する。図3に実験で用いた定置型のDS（株式会社アストジェイ社製のDS-nano-）を示す。このDSを用い、実験では片側一車線の直線道路を実験参加者に走行してもらうこととした。

実験に使用する路面呈示と車載呈示の呈示イメージを図4に示す。実験は、自車の前方に先行車が走行している状況で、5つの交差点が設置されている、片側一車線の直線道路において追従走行を行う。

先行車は、40km/hで走行中に、交差点手前で50km/hまで 1m/s^2 で加速を行い、その後、実験参加者が予期できないタイミングで急停止（ 6m/s^2 ）を行うものとした。実験では、ブレーキランプの点灯で急減速が発生することや、交差点で必ず減速を行うことによる単純反応を避けるため、交差点手前で通常の加速度（ 2m/s^2 ）や、加減速を伴わずに定速のまま走行するダミー条件を加えた。急停止が発生する交差点は、5つの交差点の内、1つ（残り4つはダミー）でランダムに設定し、実験は、先行車が急停止した時点で終了とした。このときの信号切替タイミングは、50km/hに加速した際に交差点へ黄信号中に進入し、全赤終了までに通過することが可能なタイミングとした。また、情報呈示は自車の入口側交差点から78m（40km/hで走行中の交差点進入約7s前）手前の地点通過後とした。この状況で、車載・路面呈示の順に交互に、それぞれ2走行ずつ計4走行を行った。また、前方の状況を確認するとともに呈示されている情報を確認しながら走行するものとし、走行中に先行車との衝突の危険を認識した時点で、ブレーキ操作のみで衝突を回避するよう教示した。

実験参加者は、自動運転免許を保有する、DSの運転に習熟した20代の男性2名であり、事前に文書によるインフォームドコンセントを得た。

3.2 実験結果

図5に、結果の一例として、急減速開始6s前からの速度の時系列応答を示す。0s（点線）が先行車（一点鎖線）の急減速開始タイミングである。同図より、路面呈示（実線）と車載呈示（破線）を比較すると、先行車の急減速に対して、路面呈示の方が早く反応して減速操

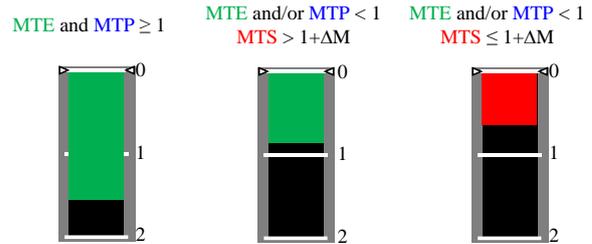


Fig. 2 Indication onboard



Fig. 3 Overview of fixed-base driving simulator



(a) On-road indication



(b) Onboard monitor

Fig. 4 Indication image of GO/NOGO indices

作を開始していることがわかる。さらに、速度の傾きも路面呈示の方が緩やかであることから、小さな減速度で停止していることが確認できる。図6に、先行車が急減速を開始してからブレーキ操作が行われるまでの反応時間を示す。同図には、実験参加者2名が走行した計4走行の平均値が示されている。ここで反応時間は、先行車の急減速に対する減速操作と速度調節のための減速操作を区別するため、先行車の急減速開始後に踏み込み量が10%以上踏み込まれるまでに要した時間としている。この図から、路面呈示の場合の方が車載呈示の場合と比べ、ブレーキ操作が開始されるまでの反応時間が短いことが確認された。

図7に、先行車の急減速に対する減速時の最大減速度の平均を示す。前述と同様に実験参加者2名の計4走行の最大減速度の平均を示す。同図から、路面呈示と車載呈示を比較すると、路面呈示の最大減速度の方が小さいことが確認された。

次に、先行車急減速時の先行車との衝突余裕時間TTCに着目する。図8に、先行車に対するTTCの最小値の平均を示す。同図より、路面呈示の方が、車載呈示と比較して、TTCの最小値が大きいことが確認された。この結果より、路面呈示により先行車との衝突リスクが低減されていることが確認できる。

4. 結論

本研究では、先行車が急制動する場面において、従来の車載表示器による呈示を想定したものと比較し、支援システムの呈示手法によるドライバの運転行動への影響について、DS実験により検討した。その結果、支援システムの呈示手法として、道路上へ視覚的に情報呈示を行うことで、先行車の急減速が発生した場合においても、車載呈示と比較して、いち早く減速操作を行うことが可能となった。その結果、小さな減速度で停止することが可能となり、先行車への衝突リスクも低減した。今後の課題として、実験参加者数を増やしたうえで実験を行う予定である。

5. 謝辞

本研究は、科学研究費若手研究(B)15K16302「GO/NOGO指標の路面呈示による信号交差点でのドライバ判断支援」の補助を受けた。実験環境構築に当たり三咲デザイン合同会社の田島淳氏にご協力いただいた。記して謝意を示す。

「参考文献」

- 1) 警察庁交通局, 平成 27 年中の交通事故の発生状況, <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do> (参照日 2016 年 10 月 12 日) .
- 2) 道辻洋平, 大竹正俊, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 信号機切り替わり時の横断歩行者に対する運転リスク評価指標の提案, 自動車技術会論文集, Vol. 44, No. 2 (2013), pp. 555-560.
- 3) 山口大助, 織田利彦, 須田義大, 田中伸治, ジレンマゾーン実験へのドライビングシミュレータの活用, 生産研究, Vol. 59, No. 3 (2007), pp. 192-196.
- 4) Kinoshita, Y., Imazumi, H. and Kato, H., "Effectiveness Evaluation of Traffic Signal Prediction Systems, Proceedings of 22nd ITS world congress", (2015)ITS-2133
- 5) 小林浩之, 中野堯, 丸茂喜高, 道辻洋平, 信号情報を用いたドライバの判断支援システム, 日本機械学会 第24回交通・物流部門大会 講演論文集, CD-ROM (2015)

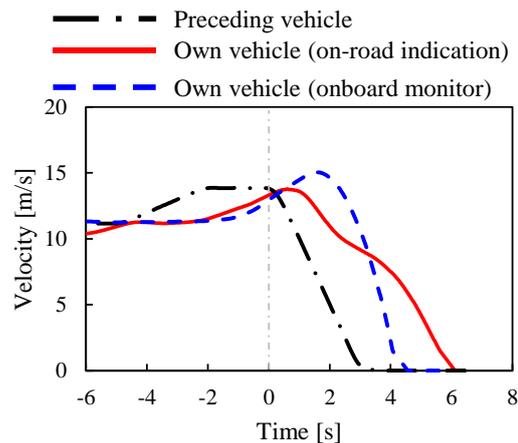


Fig. 5 Vehicle velocity (2nd trial by Participant A)

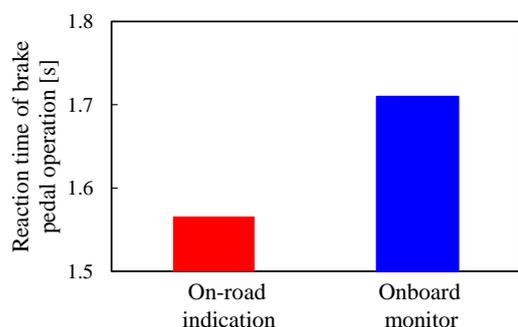


Fig. 6 Reaction time of brake pedal operation

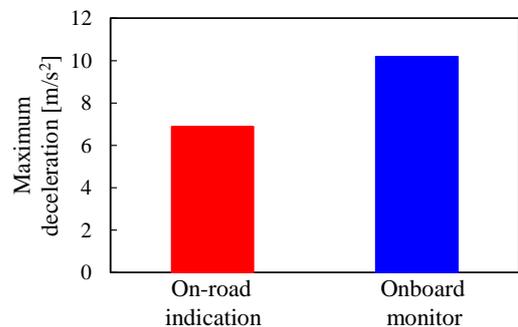


Fig. 7 Maximum deceleration

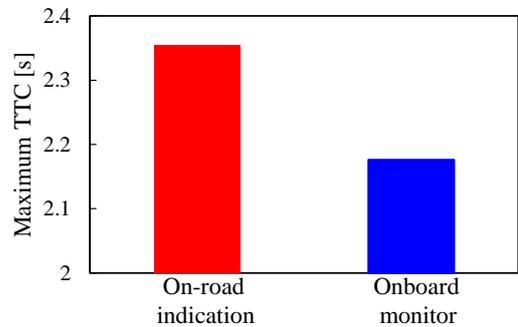


Fig. 8 Minimum TTC

- 6) 石塚悠登, 道辻洋平, 下里住史, 車載信号を活用した信号交差点における運転支援システムの提案, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集, CD-ROM (2013)