

安全確保速度に基づく 無信号交差点形状の安全度評価

里村 祥太¹・野田 賢²・杉本 謙二³

¹非会員 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 (〒630-0192 奈良県生駒市高山町8916-5)

E-mail: shota-sa@is.naist.jp

²非会員 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 准教授 (〒630-0192 奈良県生駒市高山町8916-5)

E-mail: noda@is.naist.jp

³非会員 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 教授 〒630-0192 奈良県生駒市高山町8916-5)

E-mail: kenji@is.naist.jp

安全確保速度は、自車が非優先側道路から交差点に進入するとき、交差道路の死角から現れる車両の中で、自車に衝突する可能性がある交差車両の限界速度として定義される。本論文では、安全確保速度に基づく無信号交差点形状の安全度評価法を提案する。提案法では、対象交差点の形状データから、想定する交差車両に対する安全確保速度を最適とする交差点通過行動プロフィールを数理的に探索し、そのときの安全確保速度を交差点の安全度の評価値とする。評価値が高い交差点であるほど、出会い頭事故が起こりにくい安全度の高い交差点であるといえる。提案手法を実在の無信号交差点に適用し、交差点形状の問題点を明らかにした。

Key Words : *Highest Admitted Speed, Non-signalized intersection, Safety evaluation, Driving profile*

1. 緒言

出会い頭事故は類型別交通事故原因の約3割を占め、その多くが無信号交差点で発生している¹⁾。無信号交差点における出会い頭事故の要因として、ドライバの一時不停止や不十分な安全確認を誘発する見通しの悪い交差点形状が指摘されている²⁾。安全な交差点環境実現のために、交差点の計画設計に対するガイドライン³⁾や、適切な補助視界を確保するためのカーブミラーの設置指針などが提案されている⁴⁾。また、交差点を通過する自動車の走行データ⁵⁾や交差点走行シミュレーションにより交差点の安全性を評価する方法が提案されている。しかし、交差点評価のための多数の走行データの収集に手間がかかったり、適切なシミュレーションパラメータの決定が難しいという問題がある。無信号交差点に進入する優先側車両と非優先側車両の衝突可能性を、それぞれの初期位置と初期速度から判定する簡易なモデル⁶⁾も提案されているが、衝突可能性の判定が目的であり交差点の安全度を評価するものではない。

前報⁷⁾において、ドライバの無信号交差点における通過行動の安全度を総合的に評価するための指標として、

交差点通過時の速度プロフィール、左右確認行動プロフィールおよびペダル操作プロフィールから計算する安全確保速度 (Highest Admitted Speed, 以下HASと略す) を提案した。HASは、優先側道路から現れる自車に衝突する可能性がある交差車両の最低速度として定義される。また、HASに基づく評価関数を最適とする運転行動プロフィールを、交差点の形状データから数理的に導出する方法も提案した⁸⁾。

本論文では、交差点の形状データから最適なドライバの運転行動プロフィールを数理的に導出し、最適な交差点通過行動時のHASの計算結果に基づき交差点の安全度を評価する方法を提案する。提案手法は、最適な交差点通過行動を前提に交差点形状を評価するため、その交差点で得られる安全度の上限値を与える。安全度の評価結果が要求レベル以下であれば、カーブミラーの設置や停止線の位置を変更するなどの交差点環境を改善する必要がある。

2. 安全確保速度 (HAS)

HASには交差車両との衝突形態によって様々なタイプ

のものがあり、また走行エリアが異なる交差車両ごとに定義される。以下では、交差点に右側から接近する自動車を例にHASの評価法⁷⁾を説明する。

一時停止線あり無信号交差点の座標系を図1に示す。Y軸方向の優先側道路およびX軸方向の非優先側道路はいずれも片側1車線とし、優先側道路手前側には歩道が設けられている。非優先側道路の自車は交差点を下から上へ、優先側道路の交差自動車は交差点を右から左へ通過する。車両中心が通る線を走行ライン、車両が走行する領域を走行エリア、交差車両の走行エリアの手前側を衝突ラインとよぶ。また、非優先側道路の中央線と右側自動車の衝突ラインの交点を原点とする。

HASの計算においては、交差車両は自車を発見したとしても回避行動（停止行動など）をとらずに等速で直進走行すると仮定する。自車ドライバーが右側交差車両を発見直後に停止行動をとった場合、交差車両と衝突することなく停止できる位置で右側を確認した最も交差点に近い位置を右側交差車両に対する最終有効確認位置として定義する。

図1において右側交差車両に対する最終有効確認位置における自車先端位置を $P_1(-p_1, q_1)$ とする。 P_1 において右側交差車両の未確認エリアの先端位置を $P_2(p_2, -q_2)$ とする。未確認エリアとは、遮蔽物により自車の位置から衝突する可能性のある交差車両の存在を確認できない交差車両の走行エリア上の領域である。

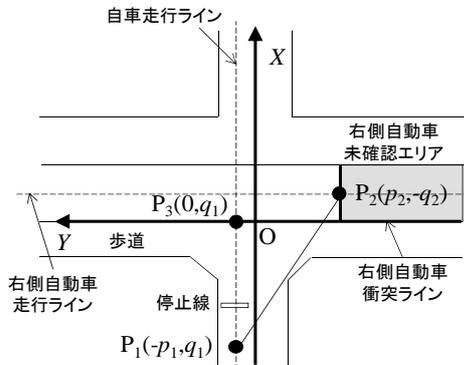


図1 HAS計算のための交差点座標系

未確認エリアから現れる交差車両の速度で、自車先端が交差対象車両先端に $P_3(0, q_1)$ で衝突する可能性のある限界速度HASは(1)式により求められる。

$$HAS = q_2 / (t_{P_3} - t_{P_1}) \quad (1)$$

(1)式の t_{P_1} および t_{P_3} は、自車の先端が P_1 および自車先端が、交差対象物に衝突する可能性のない限界位置 P_3 に到達した時刻である。

3. 交差点形状の安全度評価法

本論文では、無信号交差点形状の評価指標として、交差点の最適通過行動時のHAS値を用いることを提案する。以下では、まず少数のパラメータで最適な交差点の通過行動プロフィール（速度プロフィール、ペダル操作プロフィール、最終有効確認位置）を数理的に導出する方法⁸⁾を説明する。

(1) 最適な交差点通過行動プロフィールの探索法⁸⁾

図2に示すように交差車両 i ($i = 1, \dots, N$) の衝突ライン位置 x_i における自車速度を v_i とする。ただし、一時停止線の先端位置を x_0 とし、自車先端が x_0 にあるときの速度を v_0 、時刻を t_0 とする。

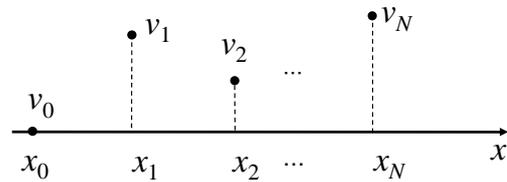


図2 速度プロフィールモデルパラメータ

区間 $x_{i-1} \sim x_i$ を自車が一定加速度 a_i で走行すると仮定する。位置 x_i を自車先端が通過した時刻を t_i とするとき、区間 $t_{i-1} \sim t_i$ の任意の時刻 t における自車速度プロフィール $v(t)$ は(2)式より求められる。

$$v(t) = v_{i-1} + \frac{v_i^2 - v_{i-1}^2}{2(x_i - x_{i-1})} (t - t_{i-1}) \quad (t_{i-1} \leq t \leq t_i) \quad (2)$$

また、位置 x_i を自車先端が通過した時刻 t_i は、(3)式により決まる。

$$t_i = t_{i-1} + \frac{2(x_i - x_{i-1})}{v_i + v_{i-1}} \quad (i = 1 \sim N) \quad (3)$$

つぎに、速度プロフィールから、ペダル操作プロフィールを決定する。ドライバーの右足は、自車が速度 4 km/h 以上で加速中のときはアクセルペダルに、それ以外は常にブレーキペダル上に置かれていると仮定する。これは、加速時以外はブレーキペダル上に足を常に置くことがブレーキが必要な場合の反応時間を短くする模範的なペダル操作であると考えられるからである。このとき、ペダル操作プロフィール $p(t)$ は、(4)式で表わされる。

$$p(t) = \begin{cases} 1(\text{Accel}) & \text{if } a(t) > 0 \wedge v(t) \geq 4 \\ 0(\text{Brake}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

最終有効確認位置が対象交差車両の衝突ラインに近い

ほど HAS は高くなる．最終有効確認位置となり得る位置で最も衝突ラインに近いのは，ブレーキにより急制動したとき自車先端が交差車両の衝突ライン直前で停止できる位置（停止可能限界位置）である．しかし，実際の運転において常に停止可能限界位置の直上で交差車両方向を確認するとは限らない．そこで，各交差車両に対する最終有効確認位置を，停止可能限界位置から Δt_d 秒手前の位置とした． Δt_d は，最終有効確認位置と停止可能限界位置との通過時刻の時間差を表すパラメータである．

交差車両 i に対する最終有効確認時刻 $t_{c,i}$ を(5)式により求める．

$$t_{c,i} = t_i - \Delta t_b - \Delta t_f - \Delta t_d \quad (5)$$

ここで， Δt_b は制動時間， Δt_f は空走時間である．制動時間 Δt_b は，(6)式を解くことで求めることができる． f は摩擦係数である．

$$\Delta t_b = \frac{v(t_i - \Delta t_b)}{9.8f} \quad (6)$$

本論文では，空走時間 Δt_f は，ドライバの右足がアクセル上にあるとき $\Delta t_f = 0.75$ 秒，ブレーキ上にあるとき $\Delta t_f = 0.2$ 秒とした³⁾．また，左右から来る 2 台の交差車両についての最終有効確認位置への到達時間差が 1 秒以内であるときは，所要時間を考慮して，時間差が 1 秒となるように，先に確認する交差車両に対する最終有効確認位置を交差点の手前方向にずらした．最終的に，交差車両 i の最終有効確認位置 $x_{c,i}$ は，(7)式により与えられる．

$$x_{c,i} = x_i - \int_{t_{c,i}}^{t_i} v(t) dt \quad (7)$$

未確認エリアから現れる交差車両の速度を表す HAS には，自車先端が交差対象物先端に衝突する可能性のある交差車両の限界速度 HAS1 と，自車が交差車両に衝突されることを回避できる交差車両の限界速度 HAS2 の二種類がある．HAS1 では自車が交差車両に衝突することを想定するのに対して，HAS2 では自車が交差車両に衝突されることを想定する．HAS1 は制約条件，HAS2 は努力目標とすることで，最適な通過行動プロフィールを導出する問題は以下のように定式化される．

$$\text{Maximize } \left\{ \min_{i \in I} (w_i h_{2,i}(\mathbf{v})) \right\} \quad (8)$$

$$\text{subject to } h_{1,i}(\mathbf{v}) \geq h_{1,i,\min} \quad (9)$$

$$0 < v_i \leq v_{\max} \quad (10)$$

$$|a_i| \leq a_{\max} \quad (11)$$

$$0 < t_p \leq t_{p,\max} \quad (12)$$

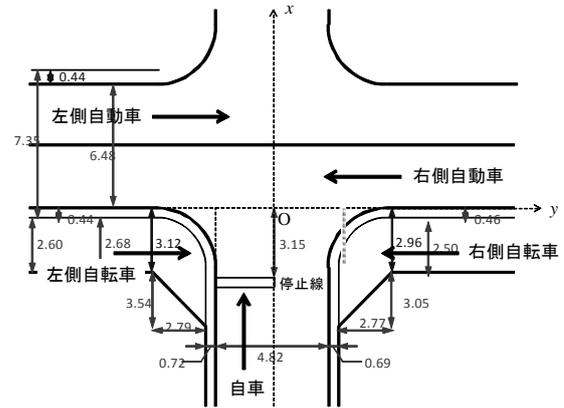
ここで， $\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_N]$ は速度プロフィールのパラメータで最適化変数， I は対象交差車両番号 i の集合である． $h_{1,i}(\mathbf{v})$ および $h_{2,i}(\mathbf{v})$ は交差車両 i に対する HAS1 値および HAS2 値， w_i は重み係数， $h_{1,i,\min}$ は $h_{1,i}(\mathbf{v})$ の下限値， v_{\max} は v_i の上限値， a_{\max} は $|a_i|$ の上限値， t_p は交差点を通過する所要時間， $t_{p,\max}$ は t_p の上限値である．

(2) 交差点形状の安全度評価指標

(8)~(12)式からなる探索問題は， $\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_N]$ を最適化変数とする N 次元の非線形計画問題であり，一般的な非線形計画ソルバーを利用して最適解を得ることができる．提案法では，評価対象交差点形状に対して，最適通過行動プロフィールを導出し，そのときの各交差車両に対する HAS2 の計算結果を交差点形状の安全度評価指標として用いる．HAS2 の値が大きいくほど，出会い頭事故が起こりにくいより安全度の高い交差点形状であるといえる．

4. 評価例

提案手法により実在する交差点の安全度を評価した．図 3 に交差点の形状を示す．交差車両として，左右からの自転車と自動車の四種類 ($N = 4$) を想定する．右側自転車を 1，左側自転車を 2，右側自動車を 3，左側自動車を 4 とナンバリングし，停止線および各交差車両の衝突ラインの位置を図 3 に示す．左側自転車と右側自転車の走行ラインは同じであるため $x_1 = x_2$ となる．



停止線と衝突ラインの位置					
i	0	1	2	3	4
x_i [m]	-3.15	-2.0	-2.0	0.0	3.24

図 3 評価対象交差点の形状

交差点を通過する交差車両および交差自転車の速度分布を実測した結果，自動車の最大速度は約 60 km/h，自転車の最大速度は約 15 km/h であった．そこで，重み係数 w_i および HAS1 の下限値を表 1 のように定めた．その

他のパラメータは、 $t_0=0$ 秒、 $v_0=0$ km/h、 $v_{\max}=20$ km/h、 $a_{\max}=2$ m/s²、 $t_d=1.0$ 秒、 $t_{p\max}=10$ 秒とした。なお、通過時間の上限値は熟練ドライバーの実際と同じ交差点を走行してもらったときの通過時間を参考に決めた。

表 1 最適化問題のパラメータ設定

i	1	2	3	4
w_i [-]	1/15	1/15	1/60	1/60
$h_{i\min}$ [km/h]	15	15	60	60

交差点形状の安全度の評価結果を表 2 に示す。このとき、自転車と自動車に対する HAS1 値は、制約条件である 15 km/h、60 km/h 以上を満たした。HAS2 の評価結果を見ると、自動車 ($i=3, 4$) に対する HAS2 値は対象交差点を通過する交差自動車の最高速度と同等かそれ以上となっているものの、左右からの自転車 ($i=1, 2$) に対する評価は交差自転車の最高速度よりも大幅に低かった。これは、対象交差点の自転車の走行ラインにおける左右の見通しが悪く、また同じ走行ラインを走る左側自転車の確認のために右側自転車に対する最終有効確認位置がかなり手前（左側自転車に対する最終有効確認位置から 1 秒手前の位置）となったためである。交差点の安全度を改善するためには、停止線の位置を交差点の中心に近づけるなど、交差点入口での非優先側車両の速度を十分低下させるような交差点環境の見直しが必要である。

表 2 安全度評価結果

i	1	2	3	4
h_{1i} [km/h]	15.2	24.7	137.0	169.5
h_{2i} [km/h]	6.0	7.1	59.0	98.0

5. 結言

安全確保速度 (HAS) に基づく無信号交差点形状の安全度評価法を提案した。提案法では、対象交差点の形状データから、想定する交差車両に対する最適な交差点通

過行動プロフィールを数理的に探索し、最適通過行動時の HAS 値を交差点の安全度の評価値とする。提案手法は、交差点の形状データさえあればよく、また評価の前提となる交差点通過行動の基準が明確である。今後、様々な交差点形状の評価を通じて、安全な交差点の設計に役立つと期待される。

参考文献

- 1) 警察庁交通局：平成 22 年中の交通事故の発生状況, 2010.
- 2) Mori, M, Horino, S., Kitajima S., Ueyama, M., Ebara, T. and Tani, T : Ergonomics solution for crossing collisions based on a field assessment of the visual environment at urban intersections in Japan, *Applied Ergonomics*, Vol. 39, pp. 697-709, 2008.
- 3) 交通工学研究会：改訂 平面交差の計画と設計 基礎編 第 3 版, 2007.
- 4) 久保登, 森みどり, 堀野定雄：鏡像シミュレーションによる交差点ミラー視認性向上のための設置条件検討, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 768, pp. 2154-2159, 2010.
- 5) 馬場拓也, 永尾慎一郎, 手塚誠, 川岸孝治, 中村英樹：民間プローブデータを活用した道路交通性能評価指標の検討, 土木計画学研究講演集, 43, pp. 10, 2011.
- 6) 松尾幸二郎, 廣島康宏：細街路無信号交差点における出会い頭事故危険性評価のための理論モデルの構築, 第 9 回 ITS シンポジウムプロシーディングス, pp. 49-54, 2010.
- 7) Kamon, T., Umehara, S., Kosaka, H., Noda, M., Nishitani, H., Mizoguchi, Y., Kobana, M., and Sasaki, K. : Evaluating Risk Levels of Driver Behaviors on Basis of Vehicle Speed and Driver Eye-movement and Pedal Operation, *Review of Automotive Engineering*, Vol. 31, final, pp. 144-149, 2010.
- 8) 粕谷悠介, 野田賢, 西谷紘一：安全確保速度に基づく模範的な無信号交差点通過行動の数理的探索法, ヒューマンファクターズ, in press

(?)

SAFETY EVALUATION METHOD OF NON-SIGNALIZED INTERSECTION BASED ON HIGHEST ADMITTED SPEED

Shota SATOMURA, Masaru NODA and Kenji SUGIMOTO

Highest admitted speed (HAS) is a quantitative evaluation index of the risk level of a driver's behavior when passing through a non-signalized intersection without the right of way. In this study, we propose a safety evaluation method of the non-signalized intersection based on HAS. In the method, the optimal driving profiles is searched mathematically in accordance with the shape of the intersection. The optimal values of HAS for various vehicles are used as safety evaluation indices of the intersection. In the case study, the safeness of a specified intersection was evaluated. By analyzing evaluation results, we could identify the unsafe shape of the intersection.