外部作動型エアバッグのための車の衝突危険領域に関する考察*

土屋 幸也** 白石 昌武***

A Study on a Critical Car-Crash Region for an External Airbag System

Yukiya TSUCHIYA and Masatake SHIRAISHI

An external airbag system in which the airbags deploy outside the vehicle before a collision has been developed. The aim of this system is to reduce impact at collision and to avoid secondary accidents after collision. The key point in this airbag system is "How to decide that a dangerous collision is about to occur." For this solution, a collision unavoidable region was proposed by taking a vehicle travel trace into account. In the case of frontal and backside collisions, the decision making of airbag triggering is based not only on sensor information but also on the driver's collision avoidance behavior. On the other hand, in the case of encountering collisions, the corresponding unavoidable region was determined from sensing technologies. Simulation results show the effectiveness of the proposed decision making.

Key words: external airbag, frontal and backside collisions, encountering collision, collision unavoidable region, decision making

1. 緒 言

第3次交通戦争と呼ばれ社会問題の一つとなっている交通災害に対して、車の安全性への要求は年々高まりつつある。一般に車の安全性には事故を起こさないための予防安全と、事故が起きたとき人的被害を最小限度にとどめる衝突安全とがある。本研究は後者について行ったもので、筆者らはそのために最近外部作動型エアバッグを開発した。衝突危険を事前に予測し、危険と判断された場合にエアバッグを車の外側に開く方式である。このシステムの問題点は衝突危険をどのように決定するかであった。

本報告は、衝突危険判断のための衝突危険領域について考察したものである。交通災害に関する調査報告によると、衝突には非常に多くのケースがあり、それら一つ一つについて検討することは極めて困難である。そこで、交通災害の8割が正面衝突、追突それに出会い頭によるものであるという現状を踏まえ、まず正面衝突と追突を想定し、その場合の運転者の衝突回避行動を考慮した衝突危険領域について考察する。つぎに出会い頭については、運転者の衝突回避行動がほとんどとれない突発的な事故であることから、センシングのみによる衝突危険領域を求める。このような領域を決定することで、今後より信頼性の高いエアバッグ作動法の開発が期待できると考える。

2. 問題の提起

筆者らがこれまで行ってきた、正面衝突および追突を対象とした一連の研究¹⁾を簡単に述べ、それを踏まえて本研究の問題提起に至った経過を簡単に説明する。

一連の研究は大きく次の二つに分けられる。

- (1) センシングとエアバッグの開発に関する研究
- (2) 衝突危険判断アルゴリズムに関する研究

(1)については、実験用車両の周囲に図1に示すような外部作動型エアバッグを開発した（前・後部バンパ内およびドアの内側に装備）。これらは衝突時の衝撃緩和、およびその直後の二次的災害に対処するためのエアバッグで、シートベルトとの併用で極めて大きな効果が得られると思われる。衝突危険をコンピュータとセンサにより予測し、危険と判断された場合にエアバッグを衝突直前に外部に作動させる方式である。使用したセンサはCCDカメラ、超音波センサ、速度センサおよびレーザ測距装置である。しかし衝突危険という状態をどのよう

に判断するかが問題となった。

そこで(2)の研究では、センシングをベースとして、運転者の衝突回避行動を考慮しない場合の正面衝突および追突を想定し、次のような衝突判断について検討した²⁾。

- ① 前方の物体との距離を測定し、距離の時間変化から相対速度を算出する。
- ② 得られた距離と相対速度を基に、センシング時の次のサンプリング（1 ms）までに自車の進む距離を演算する。
- ③ 算出された自車の進む距離が、物体までの距離よりも大きい場合に危険と判断し、その危険信号に従ってエアバッグを作動させる。

レーザ測距装置を用いて本手法の動作実験を模擬的に行ったところ、この判断アルゴリズムおよびそれによるエアバッグの作動共に良好な結果を示した。しかしこの手法では、運転者の衝突回避行動を考慮に入れていないため実際のでないという問題が生じた。

このような研究経過を背景に、少なくとも正面衝突および追突の場合は、センシングを基本としながらも運転者の回避行動を考慮にいった、より実際の衝突危険判断法の構築が必要であるとの結論に達した。

Fig.1 External airbag system

3. 正面衝突および追突における衝突回避不能領域

直線走行中、前方に障害物を見出した際の運転者の衝突回避行動には種々考えられるが、基本的には次の三つの場合がある。

- (1) ブレーキをかけ、障害物の手前で停止する。
- (2) ハンドル操作を行い、障害物を回避する。
- (3) ブレーキをかけると同時にハンドル操作を行う。

(2)、(3)の動作には状況に応じて左右両方向ある。したがって(1)によって常に衝突を回避できれば問題ないが、(2)と(3)の回避行動をとった場合は、図2の斜線部に示すように、両方向の軌跡の交点Cpと車幅を底辺とするある領域で表される、回避不能となる部分（衝突回避不能領域）が存在する。すなわち、少なくともこの領域に存在する障害物は、自車と衝突すること

* 原稿受付 平成9年6月30日

** 学生会員 茨城大学大学院（日立市中成沢町4-12-1）

*** 正会員 茨城大学工学部

になる。実際には、図2の領域を図3に示すように衝突回避不能領域内の頂点Cpと、車のバンパ両端P、Qを結んでできる直線領域で表し、この領域に対してセンシングを行うことになる。以後この領域を監視領域、頂点Cpをクロスポイントと呼ぶ。クロスポイントは監視領域を決定する上で重要な要素となる。そこで、車の軌道をシミュレーションすることによってクロスポイントを求める。

Fig.2 Driver's collision avoidance operation

Fig.3 Crash unavoidable region

4. 車の軌道シミュレーション

4.1 静止物体への対応

監視領域を求めるに当たり、まず前方物体が静止している場合を考える。図4において、操舵開始時点の車の重心座標を原点0とし、縦軸に操舵前の進行方向Y、横軸にそれと垂直な方向Xをとると、車の重心座標 $G(x, y)$ は次式で表せる。

$$\begin{cases} x = \int V \cdot \sin \phi \cdot dt \\ y = \int V \cdot \cos \phi \cdot dt \end{cases} \quad (1)$$

ここに V ：自車速度、 ϕ ：進路角を表す。

さて座標を図4のようにとった場合の車の運動は以下のようになれる³⁾。

① 進行方向に垂直な力の釣合い：

$$(W/g)V\dot{\phi} \approx K_f^* \{s + \beta - (l_f^*/V)\dot{\theta}\} - 2K_r^* \{\beta + (l_r^*/V)\dot{\theta}\} \quad (2)$$

右辺の第1項および第2項は、それぞれ前輪と後輪のコーナリングフォースを表す。

② 車の重心回りのモーメントの釣合い：

$$J_z \ddot{\theta} \approx l_f K_f^* \{s + \beta - (l_f^*/V)\dot{\theta}\} - 2l_r K_r^* \{\beta + (l_r^*/V)\dot{\theta}\} \quad (3)$$

左辺はヨーイングモーメントで、式(2)のコーナリングフォースと l_f 、 l_r を用いて表されている。

ここに

$$l_f^* = l_f \{1 - (0.07 - 0.02\ddot{x})/l_f V^2\}$$

$$l_r^* = l_r \{1 + (0.07 - 0.29\ddot{x})/l_r V^2\}$$

$$K_f^* = 4030(1 - 1.05\ddot{x} - 0.40\ddot{x}^2)$$

$$K_r^* = 3300(1 + 1.26\ddot{x} - 0.40\ddot{x}^2)$$

で、 l_f^* 、 l_r^* は横加速度に依存した前輪と後輪の角度変化に関する

係数、また K_f^* 、 K_r^* は前輪と後輪のコーナリングパワーである。なおコーナリングフォースの傾きをコーナリングパワーと呼ぶ。

③ 姿勢角 θ 、進路角 ϕ および横滑り角 β の間の関係：

$$\phi = \theta - \beta \quad (4)$$

④ 実舵角 s 、最終舵角 s_0 のときの過渡的操舵に関する式：

$$s = s_0(1 - e^{-t}) \quad (5)$$

過渡的操舵とは、走行中に操舵角 0° からある最終舵角まで単調に操舵し、最終舵角で操舵を長く維持する場合の操舵形式を言う。

ここに W ：車両質量、 l_f (l_r)：両前輪(両後輪)間の中心から重心までの距離、 J_z ：車のヨーイング慣性モーメントである。

以上の式(1)~(5)を解き、重心 G を求めることによって車の軌道がシミュレーションできる。

Fig.4 Model of a vehicle travel

4.2 シミュレーション結果

本研究の第一段階として、乾いた路面での通常走行(自車速度80km/h以下)からのブレーキングを想定して以下考察する。その場合の予備考察によると、車速、減速度、舵角、およびタイヤと路面との摩擦は、クロスポイントを決定する上で重要な要因であることが判明した。そこで主なパラメータとして、 $W=1350$ kg、 $l_f=1.1$ m、 $l_r=1.4$ m、 $J_z=200$ kg·m²を有する代表的な普通乗用車を例に、車速を変えた場合のシミュレーションを行った。なお以下の(1)~(3)のシミュレーションでは、搭乗者はドライバーの1名(70kg)のみとした。また実走行に関して次の補足説明しておく。

・タイヤと路面との摩擦係数 μ ：0.2(雨天時の路面)~1.2(乾き切った路面)⁴⁾。

・減速度：減速した場合の車の慣性[G]で表現し、一般の走行状態(自車速度80km/h以下程度)から普通のブレーキングをした場合が0.5G以下とされている⁴⁾。

・操舵角：80km/h以下程度の速度では通常 10° 以内。

(1) 減速度を変えた場合

ある初速度で走行中、ブレーキングしたときの減速度0.1、0.3、0.5Gに対するクロスポイントまでの距離を図5(a)に示す。 $\mu=1.2$ 、最終舵角 5.0° の場合で、減速度が大きいくほど距離は小さく、また初速度がおおよそ30km/h以上では速度に比例して距離が大きくなる。低速度での曲線状の特性は、車がクロスポイントに到達する前に、減速によって停止状態となることを示している。

(a) result for the change of deceleration

(c) result for the change of friction

(b) result for the change of final steering angle

(d) result for the change of load

Fig.5 Distance to the cross point

(2) 舵角を変えた場合

減速度0.5G, $\mu=1.0$ のときの舵角に対するクロスポイントまでの距離を図5(b)に示す。最終舵角が大きいほどクロスポイントまでの距離は短く、また舵角が小さくなると曲線状の特性を示す傾向にある。この理由は図5(a)の場合と同様である。

(3) 摩擦係数を変えた場合

最終舵角5.0°および減速度0.3Gとして、摩擦係数を変えた場合の結果を図5(c)に示す。 $\mu=0.8\sim 1.2$ ではクロスポイントまでの距離に大きな変化は見られない。また参考までに求めた $\mu=0.4$ の路面が少し濡れた状態ではその距離が著しく大きくなり、摩擦が小さくなるにつれてクロスポイントまでの距離が増加することが確かめられる。

(4) 荷重を変えた場合

参考までに、荷重としてドライバーの他に搭乗者が、1人(70kg)～3人(210kg)加わった場合を想定して求めた結果を図5(d)に示す。車内の前1名(ドライバーのみ)、前2名、前2名+後1名、前2名+後2名の4つの場合について比較したもので、荷重が増えたとクロスポイントまでの距離は若干大きくなる。しかし想定していたほど荷重に大きく影響されないことがわかる。

以上の結果より、減速度、舵角、摩擦が小さい程クロスポイントまでの距離が大きい、つまり衝突危険領域を大きくとる必要がある。

4.3 クロスポイントに対する近似式

前述の結果からクロスポイントを決定するには、減速度、舵角、摩擦の情報を必要とする。摩擦は路面状況に依存し、この

オンライン計測法はまだ確立されていない。そこで図5の結果を基に、乾いた路面上を通常走行中にブレーキング(減速度0.5G)した場合、図3の監視領域を決定するクロスポイントまでの距離を表す式を導く。

図5(b)で各データの直線部分Aを一次近似すると、クロスポイントまでの距離 $Cp(s, V)$ は次式となる。

$$Cp(s, V) = a(s)V + b(s) \quad (6)$$

実舵角 s の関数である傾き $a(s)$ とy切片 $b(s)$ を図5(b)から求める。近似が若干困難な小さい s 付近での誤差を5%以内にとると次の6次式で表せる。

$$\begin{aligned} a(s) &= 9.8 \times 10^{-6} s^6 - 3.5 \times 10^{-4} s^5 + 4.9 \times 10^{-3} s^4 \\ &\quad - 3.5 \times 10^{-2} s^3 + 0.14 s^2 - 0.29 s + 0.53 \\ b(s) &= 3.7 \times 10^{-4} s^6 - 1.3 \times 10^{-2} s^5 + 0.18 s^4 \\ &\quad - 1.31 s^3 + 5.01 s^2 - 10.42 s + 15.51 \end{aligned} \quad (7)$$

また図5(b)の曲線部分Bについては実舵角 s に依存しないので、この場合のクロスポイントまでの距離 $Cp(V)$ は、車の重心位置からフロントバンパまでの距離を O_s として、

$$Cp(V) = V^2 / 2r_s + O_s \quad (8)$$

ここに r_s は減速度[G]である。

式(6), (8)の妥当性を確かめるため, 図6に減速度 $r_a = 0.5 G$, 静止摩擦係数1.2, 最終舵角 5.0° の場合のシミュレーションとの比較を示す. この場合式(8)で分母は1.0となる. 図よりこれらの近似式とシミュレーション結果とは良く一致していることがわかる. したがって乾いた路面での通常走行におけるクロスポイントまでの距離は, 次のようにまとめられる.

$$\begin{aligned} Cp(V) &= V^2 / 2r_a + O_a & : V < V_c \text{ または } s = 0 \\ Cp(s, V) &= a(s)V + b(s) & : V \geq V_c \end{aligned} \quad (9)$$

ここに V_c は式(9)の両式の交点における速度で, $a(s)$, $b(s)$ は式(7)で与えられる.

したがって, この式に示されるように実走行においては, 速度と舵角をオンライン検出することによってクロスポイントが求められる.

Fig. 6 Approximation by Eq.(9) and the result for moving object

4.4 移動物体への対応

前方障害物が移動物体の場合は, 上式のままでは対応できない. そこで補正を加えることにより移動物体への対応を試みる. 補正法としては自車と物体との相対速度, および物体の速度から以下のように分けられる.

(1) 相対速度 ≥ 0

物体は遠ざかりつつあるか自車と同一速度となり, 補正を行う必要はない.

(2) 相対速度 < 0

この場合, 自車から見た前方物体の速度 V_0 によって次の二つに分けられる.

a) $V_0 \geq 0$:

追突の場合のように自車と物体は同一方向に進んでおり, 自車速度より相対速度は小さくなる. したがってクロスポイントまでの距離は小さく, つまり衝突回避不能領域は前節で得た結果より狭くなる.

b) $V_0 < 0$:

正面衝突の場合のように前方物体が自車に向かって進んでくる場合で, 自車速度より相対速度は大きくなる. したがって衝突回避不能領域は前節の結果よりも大きくなる.

これらa), b)の場合におけるクロスポイントまでの距離の変化量は, 物体の速度 V_0 と, 物体が静止状態の場合の自車がクロスポイントに到達するまでの時間 $T(s, V)$ の積で与えられる. この時間は図6から容易に求められるので, a)とb)の場合の補正法としては, $V_0 \times T(s, V)$ を式(9)で求めた結果から減ずればよい.

相対速度が負の場合, 前方物体速度が $V_0 = +50$ km/h (従って自車速度が50 km/hを越える場合に適用)と, $V_0 = -50$ km/hについて, 速度が大きくなる線形部分 (図5(b)のAの部分) をシミュレートした結果を図6に併記してある.

4.5 衝突危険判断フローチャートとセンシング法の提案

前節までの結果を踏まえ, 図7に衝突危険判断のフローチャートを示す. 自車速度および操舵角をオンライン検出してクロスポイントを求め, 監視領域が設定できる. 実際のセンシング法としては, 自車速度をタコジェネレータから, また舵角を舵角センサにより検出する. さらにレーザ測距装置による距離測定から相対速度を, そして自車速度および相対速度から前方物体の速度を算出する. 監視領域内への物体進入の有無は, クロスポイントに自動追従するよう方向制御された, パンパ両端の2個の光電子センサにより行う. なおレーザ測距装置は, フロントバンパ中央に取り付け可能である.

Fig. 7 Flow chart of critical car-crash decision

5. 出会い頭への対応

出会い頭の事故はほとんどの場合, 運転者が衝突回避行動をとれない突発的な衝突である. そこでこの場合については, センシングのみによる衝突危険領域について検討する.

5.1 衝突危険領域の算出

図8に示すように車両1 (自車) が速度 V_1 , 車両2 (他車) が速度 V_2 で直進しているとき, 車両1の進行方向を横軸 X , それに垂直な方向を Y とする. また原点0は常に車両1の前面中央にあるとする. この移動座標系において, 車両2の X 軸方向の速度 V_x および Y 軸方向の速度 V_y は, それぞれ以下のように表せる.

$$\begin{aligned} V_x &= -V_1 + V_2 \cos \theta \\ V_y &= V_2 \sin \theta \end{aligned} \quad (10)$$

ここに θ は車両2の X 軸に対する傾きで, 車両1の存在領域は, $-l_1 \leq x \leq 0$, $-b_1/2 \leq y \leq b_1/2$ である. 車両2が X 方向, Y 方向それぞれについて V_x , V_y の速度を持つとすると, これが時間 t の間に車両1に衝突する条件は次のようになる.

$$\begin{aligned} x &\leq V_x \cdot t \leq x + l_1 \\ x &\leq V_x \cdot t \leq x + l_1, y - b_1/2 \leq V_y \cdot t \leq y + b_1/2 \end{aligned} \quad (11)$$

ここに l_1 , b_1 はそれぞれ車両1の全長と全幅である.

式(11)で t を消去し, y について解くと次のようになる.

$$V_y(x + l_1)/V_x - b_1/2 \leq y \leq V_y x/V_x + b_1/2 \quad (12)$$

これは車両2が $X=x$ の位置にある場合, その Y 座標が式(12)の範囲にあるとき, 車両1と衝突することを示している. さて車両2の前部コーナ点を (x_2, y_2) とし, 車両2の X 軸方向について

の範囲を考えると、図8より次式が得られる。

$$x_2 \leq x \leq x_2 + l_1 + b_2 \sin \theta + l_2 \cos \theta \quad (13)$$

ここに l_1 , b_2 はそれぞれ車両2の全長および全幅である。

したがって、式(12)に式(13)から得られる x の範囲を代入することによって衝突危険領域が求まる。

Fig.8 Coordinate system for encountering collision

出会い頭の衝突として頻繁に発生する、 $\theta = 90^\circ$ の場合の衝突危険領域を図9に示す。これは車両1, 2 (両車共 $l_1 = l_2 = 460$ cm, $b_1 = b_2 = 180$ cm を有する代表的普通車) が、速度 $V_1 = V_2 = 60$ km/h で走行中を想定したもので、車両2の前方コーナ位置が $(x_2, y_2) = (200$ cm, -200 cm) の場合である。

Fig.9 Crash unavoidable region at encountering collision

5.2 出会い頭に対するセンシング法の提案

式(12)の領域を決定する場合、自車の全長 l_1 、全幅 b_1 はあらかじめその仕様から求められる。また車両2の前方コーナ位置 (x_2, y_2) は高速カメラで検出でき、したがって x_2 の微分値である V_x も算出できる。一方 V_y のように、進行方向に対して垂直方向の他車の速度を検出できる有効なセンサはない。そこで筆者らはCCDカメラを用い画像処理を併用することで、進行方向に垂直な方向の速度を求める方法を提案し (車両2のコーナ部から検出可能)、その有効性を確認している⁵⁾⁶⁾。

さて実際問題として、走行中車両2の全長 l_2 、全幅 b_2 、それに傾き角 θ をセンサによって求めることは困難である。しかし出会い頭の事故がほとんどの場合 $\theta \approx 90^\circ$ であることを考えると、まず傾き角 θ については固定できる。またCCDカメラで捕らえた車両2の先端コーナ部分から、その車両の全長及び全幅を推

定することは不可能ではない (予備実験によると、フロントバンパの高さとボンネットの高さでもって、車両2の全長と全幅が推定可能)。4.5節で提案したセンサに加えて、CCDカメラをルームミラーに設置することで、出会い頭に対するセンシングが可能となる。

5.3 動作シミュレーション

本手法の動作確認として、図10に示すように垂直に交わる交差点における出会い頭の事故を想定し、CCDカメラからの模擬入力をもとにコンピュータシミュレーションを行った。その結果ほとんどの場合について、式(12)、(13)で得られた領域内の車両2に対し、衝突危険信号発生という動作が確実に実行されることが確かめられた。ただCCDカメラの視野角が狭くなると、エアバッグ作動のための危険信号が確実に発生されないということも確認された。これは視野角が狭くなることによって、速度 V_y の検出に誤動作が生じるためで、実際のセンシングではできるだけ広角のCCDカメラを用いる必要がある。シミュレーションではその最小限界は図10に示した 60° であった。

Fig.10 An example of encountering collision simulation

6. 結 言

正面衝突および追突を想定し、運転者の衝突回避行動を考慮した車の軌道シミュレーションを行い、衝突回避不能領域およびクロスポイントを求めた。これより監視領域を設定し、その領域内における障害物の有無により、外部作動型エアバッグを動作させるための衝突危険判断法、および実際のセンシング法を提案した。さらに出会い頭の衝突については、センシングを中心とした衝突危険領域を検討し、同じくシミュレーションによってその動作確認を行った。このような衝突危険領域の設定は、単に外部作動型エアバッグのための情報のみならず、今後開発される高度な自動車技術の情報として有効と考える。

ただ実際問題として、本報告で取り扱った正面衝突、追突、出会い頭の衝突には種々のパターンがあり、それらすべてのパターンに対して本手法により必ずしも対応できるとは限らない。この点をいかに克服するかが今後の大きな課題である。

参 考 文 献

- 1) 白石昌武：自動車衝突衝撃緩和装置，超音波，5，1，(1993) 64.
- 2) 土屋幸也，住谷秀保，白石昌武：車の衝突危険判断アルゴリズムに関する研究，1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1995) 643.
- 3) 安部正人：自動車の運動と制御，山海堂，(1992).
- 4) 久家伸友，落合清文，上野祐史，前田久三：運転行動解析に基づく追突事故要因の考察，日産技法，33，(1993) 74.
- 5) 高野進一，住谷秀保，白石昌武：複合センサによる車の衝突予測に関する研究，1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1995) 641.
- 6) 高野進一：画像処理による車両の速度検出に関する研究，平成6年度茨城大学修士学位论文，(1995).