

4. 予防安全支援システム効果評価シミュレータ（ASSESS）の開発

-シミュレータの挙動の検証とブレーキアシストシステムの効果推計例について-

自動車安全研究領域 ※田中信壽 森田 和元 廣瀬 敏也 関根道昭
交通システム研究領域 青木義郎 塚田由紀

1. はじめに

当研究所では、現在、予防安全支援システムの効果評価を行うためのシミュレータ ASSESS（A Survey Simulator to Evaluate Safety Systems）の開発を進めている。予防安全支援システムとは、ドライバの認知、判断、操作といった運転行動を適宜支援することによって、事故を未然に防ぐことを目的とするシステムである。現在、様々な予防安全支援システムの開発が行われており、それらシステムの事故低減効果を定量的に評価する技術の開発が求められている。しかし、予防安全支援システムの効果評価には、このシステムの目的が事故を未然に防ぐことであることに起因する問題点が存在している。例えば、エアバックのような衝突安全システムは、事故の発生後に作動するシステムであり、その作動状態や効果の程度は事故データから得ることができる。このため、衝突安全システムは、これらデータの事故統計分析によって効果を評価することが可能である。しかし、予防安全支援システムは作動して効果が発揮された場合、事故は発生しない。つまり、予防安全支援システムは、評価するためのデータを得ることが難しく、事故統計分析のような従来の方法では効果評価が困難である。

このため、近年、予防安全支援システムの効果評価を計算機シミュレーションによって実現しようとする技術の開発が進められている[1][2]。予防安全支援システムの効果評価を計算機シミュレーションによって行うことができるようになれば、開発した既存のシステムの効果評価を容易に行えるようになるばかりでなく、これから開発しようとするシステムの効果予測も可能になる。現在、我々が開発を進めている ASSESS もまさにこれらを実現しようとするものである[3][4]。

2. ASSESS の効果評価戦略

ASSESS による予防安全支援システムの効果評価戦略は以下のようなものである。まず、ASSESS は、コンピュータ内に創り出した仮想の交差点内に各々が独自に状況判断して走行する自律走行可能な車両を出現させる。つまり、ASSESS は、これら車両に実際の車両の挙動を模擬させることで、実交通と同等な交通環境をコンピュータ内に創り出す。そして、この交通環境のシミュレーションを設定期間（数日、数ヶ月等）分実施し、その期間内に発生する事故件数やニアミス件数を算出する。予防安全支援システムの効果評価を行う場合は、この環境内に予防安全支援システムの機能を組み込んだ（搭載した）車両を走行させてシミュレーションを実施し、その際に発生した事故件数とニアミス件数を当該システムが搭載されなかった場合のそれら件数と比較する。

現在、我々はこのような効果評価戦略の予防安全支援システム効果評価シミュレータを開発中である。本シミュレータは、この戦略を実現するために、交通流を再現する環境モデル、ドライバの運転挙動を模擬するドライバモデル、車両の運動を再現する車両モデルの3つのプログラムとこれらを制御する統括プログラムから構成されている。

本報告では、まず ASSESS を構成するこれらモデルの概要について述べる。現時点では、シミュレーションによる効果評価の全体的な流れを実現する統括プログラムは完成しつつあるが、一方でコンピュータ内に実交通流と同等の環境を創り出すプログラムの開発は、その妥当性を検証しつつ、鋭意進めている段階にある。次いで、ASSESS の内で走行する各車両の挙動の検証について述べる。最後に、今回評価対象として選定した予防安全支援システムである Brake Assist System（以下、BAS と称す。）の効果評価の一例を示す。

3. ASSESS の概要

3. 1. 構成

ASSESS は、コンピュータ内に実在する交差点をCGを用いて三次元的に再現することができ、この仮想の交差点内を予防安全支援システムの機能を組み込んだ車両（以下、エージェントと称す。）を自律走行させるマルチエージェント型シミュレータである。図1に、ASSESS の概念図を示す。

ASSESS は、環境モデル、ドライバモデル、車両モデル、そしてこれらを統合する統括プログラムで構成されている。環境モデルは、エージェントの発生スケジュールの生成を担当する。この発生スケジュールは、実際の交差点で計測された交通流データに基づいて生成され、エージェントの出現タイミングは、実交通流に近くなるように設定される。ドライバモデルは、ドライバの認知、判断、操作を模擬し実行する。このドライバモデルは、まず仮想空間に構築された建物や車両等を立体的に認知する。次いで、その情報をもとに運転行動を決定し、運転操作量を車両モデルに出力する。ASSESS は、交差点内に実在する物体を仮想空間内に3次元のポリゴンオブジェクトとして再現しており、各エージェントは可視範囲の物体に対してポリゴンレベルで前後判定を行うことができる。つまり、可視範囲に塀や植栽等が存在した場合、見通しの悪さを再現することが可能となっている。よって、実際のドライバ同様、見通しの悪いところでは、他のエージェントの発見が遅れ、その後の運転行動に変化が生じる構造とな

っている。車両モデルは、ドライバモデルから出力される運転操作量をもとに車両の位置座標を算出する。ドライバモデル及び車両モデルは、パラメータ値を変更することによって個々の挙動に特徴を持たせることが可能であり、このパラメータ値の割り当ては発生スケジュール生成時に環境モデルが行う。

3. 2. シミュレーションの流れ

本シミュレータでは準備段階として、まず統括プログラムが交差点環境を三次元的に再現した仮想空間を構築する。シミュレーションが開始されると、環境モデルが交通流の発生スケジュールを生成し、統括プログラムがこの発生スケジュールに基づいて仮想空間内にエージェントを出現させる。出現した各エージェントは、環境モデルによって割り当てられたドライバモデルの特性及び車両モデルの特性に従って自律走行を行う。また、予防安全支援システム（BAS）の搭載率等のシミュレーション条件は、シミュレート開始前に環境モデルに設定しておき、ドライバモデル特性及び車両モデル特性と一緒に各エージェントに割り当てられる。仮想空間で自律走行するすべてのエージェントの位置座標計算が終了すると事故やニアミスが発生していないかチェックした後、統括プログラムがシミュレート内の時間を進め、各モデルは次時間の計算を同様に繰り返す。本シミュレータは、このプロセスを終了設定時間まで繰り返して事故件数とニアミス件数を算出する。



図1 ASSESS の概念図

4. ドライバモデル

発生スケジュールに従って交差点内に出現した各エージェントは、自律走行を行うために、まずドライバモデルの機能によって周囲に見える物体を特定する（以下、可視判定と称す。）。但し、各エージェントには、この可視判定を行うエリアを制限する認知フィルタが適用されている。この認知フィルタは、各エージェントが、本来ならば可視物体であるため得ることができるはずの物体の情報を取得できない状況を作り出すことができる。即ち、これによって、“見えているはずなのに気づかない”といった漫然運転に相当するようなドライバの認知エラーを各エージェントが模擬することを可能にした。

例えば、図2において、車両の進行方向を中心(0°)として水平方向に±50°の認知フィルタが適応されているエージェント（白い車両）は、交差するエージェント（ピンクの車両）を図中の位置で認知することができる。一方、図3に示すように、同様に±15°の認知フィルタが適応されているエージェント（白い車両）は、交差するエージェント（ピンクの車両）を図中の位置に来るまで認知することができない。このような認知エラーを認知フィルタは実現することができる。



図2 ±50°の認知フィルタが適応されている場合



図3 ±15°の認知フィルタが適応されている場合

次いで、各エージェントは、自分にとってどのエージェントが最も危険であるかを見つけ出すためにリスク判定を行う。これは、可視判定（認知フィルタ適用）によって見える物体として判定されたエージェントに対して、ブレーキを踏むべき対象であるか、また、ブレーキを踏むべき対象であった場合どの程度の踏力でブレーキペダルを踏むべきであるかを指標として不安全度を算出する。これを可視エージェントすべてに対して行い、不安全度が最も高いエージェントを最不安全物体として特定する。エージェントは、この最不安全物体との衝突を回避する運転操作を行う。

エージェントが、衝突を回避するための運転操作として制動を選択した場合、ブレーキのタイミングとブレーキペダル踏力値を算出する必要がある。

これらは、状況（交差、追従、右左折）別に式(1)～(4)によって算出される。ここで“交差”とは、エージェント自身と最不安全物体が共に直進して交差点に進入し衝突の可能性がある状況である。“追従”とは、エージェント自身が不安全物体の後方に位置し共に直進する状態で追突する可能性がある状況である。“右左折”とは、エージェント自身あるいは最不安全物体が右折あるいは左折している状態で交差点内に進入し衝突する可能性がある状況である。交差におけるブレーキタイミングは、他車に対する視角の増加率変化 $((1/\phi)d\phi/dt)$ を指標(図4)として用いる。また、踏力値は、視角の増加率変化 $((1/\phi)d\phi/dt)$ に相対速度を掛けたものと $(1/(\text{相対距離})^2)$ を指標とした。追従及び右左折におけるブレーキタイミングは、車間距離を相対速度で除した値(TTC)の逆数であるiTTCを指標として用いた。また、その際の踏力値は、iTTCに相対速度を掛けたものと $(1/(\text{相対距離})^2)$ を指標として用いた。



図4 交差条件で踏力計算に用いる指標φ

【交 差】

・ブレーキタイミングを決定する判別式

$$Y = a * \left(\frac{1}{\phi} \right) \frac{d\phi}{dt} + b \quad (1)$$

・ブレーキペダル踏力の算出式

$$F_{bp} = c * \left(\frac{1}{\phi} \right) \frac{d\phi}{dt} * \text{相対速度} + \frac{d}{(\text{相対距離})^2} \quad (2)$$

【追 従／右左折】

・ブレーキタイミングを決定する判別式

$$F_{bp} = e * iTTC + f \quad (3)$$

・ブレーキペダル踏力の算出式

$$F_{bp} = g * iTTC * \text{相対速度} + \frac{h}{(\text{相対距離})^2} \quad (4)$$

$a \sim h$: 係数 (定数)

各式の係数の値は、エージェントが優先、非優先道路のいずれかを走行しているかによって異なる値が設定される。この係数値の違いによって、ブレーキタイミングと踏力値が優先道路と非優先道路とで変化し、優先道路を走行しているエージェントが非優先道路を走行しているエージェントに対して優先される挙動をとることを可能にしている。

5. 車両モデル

ドライバが算出した運転操作量（ブレーキペダル踏力）をもとに、車両の位置座標を算出するのが車両モデルである。以下に車両モデルが位置座標を算出するまでのプロセスを示す。なお、詳細は、参考文献[5][6][7]を参照のこと。

車両モデルは、前後方向移動の自由度及び前後のタイヤにおける回転の自由度の計3自由度を有する等価二輪車モデルである。これによって、車両モデルは、BAS の評価に重要であると考えられる前後の荷重移動とタイヤのスリップを考慮した制動挙動をシミュレートすることができる。

車両モデルは、ドライバモデルからブレーキペダル踏力 F_{bp} の入力を受け、制動トルク T_{brake} を算出する。この制動トルク T_{brake} の算出は、実車両のブレーキペダル踏力と制動トルクの関係性を事前に実験によって測定し、この結果を関数化した式（以下、 $T_{brake} - F_{bp}$ 特性関数と称す。）を用いて行う。

次いで、この T_{brake} からスリップ率 S を算出し摩擦係数 μ を求める。この摩擦係数 μ の算出は、実車両のスリップ率 S と摩擦係数 μ の関係を事前に実験

によって測定し、その結果を関数化した式を用いて行う。さらに、この摩擦係数 μ から制動力 F を算出する。なお、上述の各計算は、前輪と後輪それぞれで行う。最後に、これら前後輪の各制動力から車両の減速度 a を求め、最終的に位置座標を算出する。

6. シミュレーションの妥当性の検証

6. 1. 交差点の通過時間の検証

本シミュレータの重要な妥当性として挙げられるのが、ASSESS 内でエージェントが創り出す交通流が実交通流を同等に再現しているかという点である。そこで、今回評価対象地点として選定した実在の交差点で交通流調査を行い、その結果得られた交通流データとこの実交通流を再現することを目標に ASSESS が創り出した交通流データとを比較し、その整合性を検証した。本検証でまず問題となるのが、エージェントを交差点内に出現させる発生スケジュールと実際の車両が交差点内へ流入するスケジュールとの整合性である。この整合性については、既に先行研究で車頭間隔分布や速度分布においてマクロ的に一定の確認がとれている [8]。即ち、本結果から、交差点の進入時点では両交通流は一致しているとみなした場合、交差点内での交通流が、ASSESS と実交通流とで同等であれば本点の妥当性が確認できる。そこで、各車両（エージェント）が交差点に進入してから退出するまでにかかる通過時間について、実交通流と ASSESS の交通流とを比較することとした。ここで、交差点の通過時間を求めるにあたり、交差点への進入の判断は、交差点手前にある停止線を車両の中心点が越えた時点とし、退出の判断は、交差点を通過した後に現れる対向車両の進入を判断する停止線を自車線側へ延長したラインを車両の中心点が越えた時点とした（図5）。なお、優先道路側の車両に関してはスムーズに直進するものが多いため、今回は非優先道路側から交差点に進入する車両について交差点の通過時間を調べた。非優先道路側の車両に関しては、停止線で一旦停止を行ったり、主流側の走行車両を待ったりという時間が発生するため、交差点を通過するのに様々な時間がかかることが考えられる。これによって、各エージェントの挙動（ドライバモデル及び車両モデルの実行結果）が、実際の車両の挙動と同等であれば、この通過時間も一致してくると予想される。

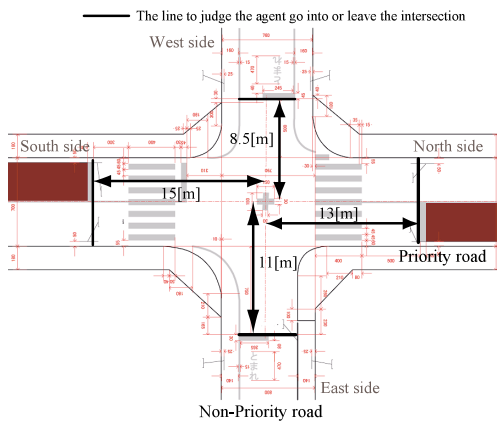


図5 交差点の中心線から各停止線までの距離

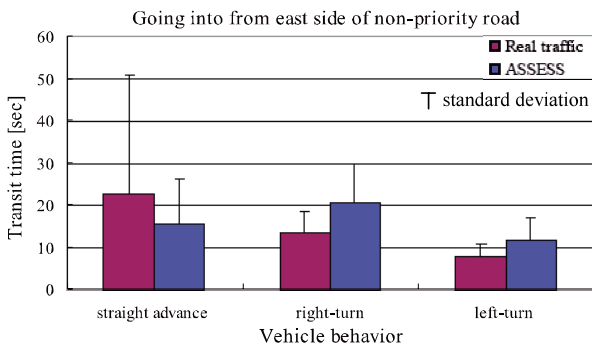


図6 通過時間（非優先道の路東側から進入）

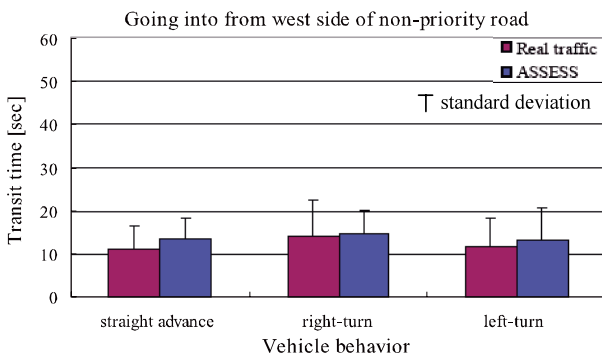


図7 通過時間（非優先道の路西側から進入）

非優先側道路側から進入する車両が直進した場合、右折した場合、左折した場合の通過時間を図6及び図7に示した。図6は、非優先道路の東側から進入した車両、図7は非優先道路の西側から進入した車両についての結果である。いずれにおいても、ほぼ測定値と計算値とは一致していると考えられる。

以上より、ASSESS が生成する交通流は、実交通流とマクロ的に同等であることが推測され、この観点からは、本シミュレータを構成する環境モデル、ドライバモデル、車両モデルについて一定の妥当性が確認できたと考える。但し、ドライバモデルは、ドライバが人間である以上その行動には不確定部分

が多いため、エージェントの挙動（ブレーキペダル踏力の時間特性等）を個体レベルでミクロ的に実車両の挙動と比較、分析し、さらなる模擬精度の向上を図ることが望ましいと考える。

6. 2. BASの効果推計例

ASSEES では、現在 BAS を予防安全支援システムの効果評価の対象としている。この BAS とは、ドライバが行うブレーキペダルの操作量から緊急ブレーキの判断を行い、緊急ブレーキが踏まれていると判断した場合に制動力を増加させるシステムである。特に今回組み込む BAS は、緊急ブレーキの判断をブレーキペダルの踏み込み速度値が設定した作動閾値を越えるか否かで判断するタイプの BAS とした。このタイプの BAS は、踏み込み速度検知型 BAS と呼ばれ、多くの実車両で採用されている。

本シミュレータは、この BAS の機能を、車両モデルが、ドライバモデルから出力されたブレーキペダル踏力を用いて制動トルクを算出するプロセスで実現している。即ち、ドライバモデルから出力されるブレーキペダル踏力の時間変化（踏み込み速度）が作動閾値を越えた場合に BAS の機能が作動する。この BAS 作動時には、非作動時にブレーキペダル踏力値から制動トルクを算出する $T_{brake} - F_{bp}$ 特性関数を、制動トルクがかさ上げされる $T_{brake} - F_{bp}$ 特性関数に置き換え、この関数を用いて制動トルクを算出する。詳細は、参考文献[5][6][7]を参照のこと。

図8及び図9に、BAS の効果評価の妥当性を検証するためのサンプルとして算出した効果評価の一例を示す（BAS 搭載率：80[%]、期間：6ヶ月、24時間日中の条件（夜間なし））。図8は、シミュレート期間6ヶ月の間に発生する事故件数、図9は同期間のニアミス件数である。このように、シミュレータの基本機能として、一連の効果評価を行うことが可能な段階にあることが確認できた。また、今回のシミュレーション結果では、事故件数は一ヶ月あたり0.5件、ニアミス件数は一ヶ月あたり600件であったが、本結果に大きな影響を及ぼすドライバモデルは未だ開発中であり、この結果が本条件の最終的な効果評価とは考えていない。今後は、この結果を分析しドライバモデルの開発にフィードバックしつつ、普及率を変化させた場合、どのような結果の違いが生じるか検討していく予定である。

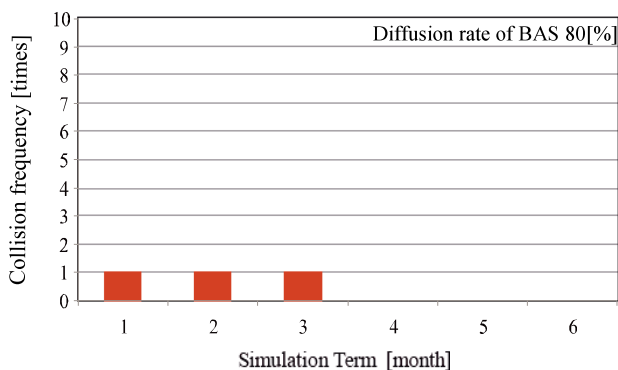


図8 衝突回数 (BAS 普及率 80[%], 期間 6 ヶ月, 24 時間日中の条件 (夜間なし))

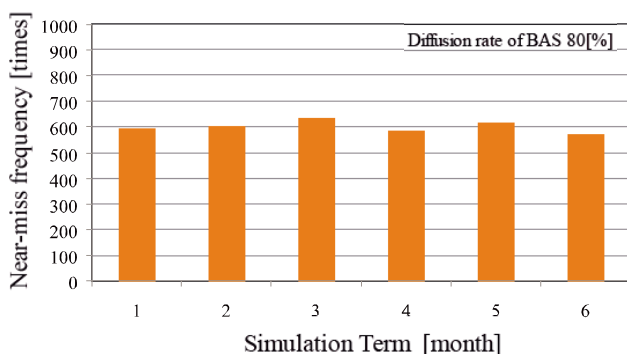


図9 ニアミス回数 (BAS 普及率 80[%], 期間 6 ヶ月, 24 時間日中の条件 (夜間なし))

7. まとめ

ASSESS は、環境モデル、ドライバモデル、車両モデル、そしてこれらを制御する統括プログラムによって、コンピュータ内に仮想の交差点を創り出し、自律走行可能な車両（エージェント）を出現させることを実現している。但し、ASSESS では、この自律走行する車両の挙動が実際のドライバが運転する車両の挙動と同等であることが重要であり、この点を検証する必要がある。今回はこの検証を交差点の通過時間の比較から行った。その結果、ASSESS が創り出す交通流の通過時間と交通流調査の観測データ分析から得た実交通流の通過時間がほぼ一致することが確認された。この点から ASSESS 内を走行する車両が実際の車両と同等の挙動を行っていることが推測される。また、BAS の一例について効果評価を行い、現段階でシミュレータとして、一連の効果評価が可能な段階に入っていることが確認できた。

今後は、各エージェントの挙動と実際の車両の挙動とを個体レベルで比較していくことでミクロ的な妥当性の検証も進め、さらにドライバモデルの高

度化を図っていこうと考えている。加えて、このドライバモデルの高度化によってシミュレーション全体に一定の妥当性が確認された後には、BAS の普及率に対する効果の変化や仕様の違いによる効果の変化等の評価も実施していく予定である。また、夜間条件のシミュレーションや評価対象として他の予防安全支援システムの検討も行っていきたいと考えている。

参考文献

- [1]H. Kitaoka, et al. : STREET: Simulator for safety evaluation -Reproduction of traffic accidents and evaluation of safety systems-, 15th ITS world congress, CD-ROM, pp.1-12, 2008
- [2] 酒井ほか：計算結果信頼性確保を目指した予防安全シミュレータ ASSTREET の開発」(第 1 報～第 4 報), 自動車技術会学術講演会春季大会 2009, No.60-09, pp.1-18, 2009.
- [3] 森田ほか：予防安全対策技術の効果評価のための交通事故発生シミュレーションプログラムの開発概要；平成 19 年度交通安全環境研究所研究発表会講演概要, pp.73-76, 2007.
- [4]塚田ほか：予防安全支援システム効果評価シミュレータ (ASSESS) の開発 -ドライバモデルにおけるヒューマンファクタの再現方法-,平成 20 年度交通安全環境研究所研究発表会講演概要, pp.47-50, 2008.
- [5] N. Tanaka, et al. : Development of a Simulator to Evaluate the Effect of Active Safety Support Systems", FISITA 2008 world automotive congress, CD-ROM F2008-08-142, 2008.
- [6]田中ほか：予防安全支援システム効果評価シミュレータ (ASSESS) における車両モデルの開発, 自動車技術会学術講演会春季大会 2009, No.60-09, pp.25-30, 2009.
- [7] N. Tanaka, et al. : Development of algorithm to calculate the agent's position for A Survey Simulator to Evaluate Safety System (ASSESS), ITS world congress 2009, CD-ROM 3071, 2009.
- [8] 青木ほか：予防安全支援システム効果評価シミュレータ (ASSESS) のための交通流データの測定, 自動車技術会学術講演会秋季大会 2008, No.112-08 pp.11-14, 2008.