

ITS 統合シミュレータのプロトタイプ

関 馨[†] 高井 峰生^{††}

路車間通信や車車間通信を用いた ITS の安全運転支援サービスでは、情報伝達によってドライバの注意を喚起し、ドライバの不注意や反応遅れを防ぐことが行われる。様々な交通環境の中で、どの程度こうした安全運転支援システムが有効であるかを事前に予測するためには、通信による情報提供やドライバの反応、交通流の変化を同時にシミュレートすることが必要であり、これらを統合的に実行するシミュレータの開発が期待されている。JARI は交通流、通信、ドライバなどの個別のシミュレータを連携させ計算機で動作する統合シミュレータのプロトタイプを構築した。本発表はプロトタイプシミュレータの構成、機能、評価について紹介するものである。

An Prototype of Integrated Simulator for ITS

KAORU SEKI[†] MINEO TAKAI^{††}

With ITS safe drive support systems that employ road-to-vehicle communication and inter-vehicle communication, information is provided in order to call the drivers' attention and avoid the inattention of drivers or the delay in their responses. In order to forecast to what extent such assistances for safe drive are effective in various traffic environments, it is necessary to simulate the provision of information by communication, driver's response and fluctuation of traffic flow at the same time. The development of simulators that can perform these operations in an integrated manner is expected. The Japan Automobile Research Institute (JARI) has built a prototype simulator that can simulate on a computer traffic flow, communication network performance, radio propagation, and driver behavior in an integrated way. This report describes the configuration, functions, and performance of the prototype of an integrated simulator built by JARI.

1. はじめに

ITS の分野では車車間通信や路車間通信を用いる安全運転支援システムの実用化に向けた研究がこの数年盛んになっており、世界各地でフィールドテストを含む様々な検討が行われてきた。こうしたシステムが実際に展開された場合の事故の低減効果をフィールドテストで予測する試みも行われているが、現状ではコストや実験上の制約があり限定的な予測しかできていない。一方、計算機を利用して交通流や無線通信の動作を予測するシミュレータは既に市販レベルのものも現れていることから、これらを統合して運転支援システムの効果予測の手段として活用する試みが国内・海外で具体化されつつある。

(財)日本自動車研究所 (JARI) では、提供された情報に対する個々のドライバの行動変化も表現できる交通流シミュレータ、通信のプロトコルを表現する通信シミュレータ、電波伝搬シミュレータなどを安全運転支援システムのシナリオに従って同時に動作させる統合シミュレータのプロトタイプを構築した。この狙いはプロトタイプを構築することにより、統合化の技術的な課題を明らかにしながら、これを利用して様々なシミュレーション結果の検証方法、利用方法に関する検討を進めることである。

本稿では、統合シミュレータプロトタイプ構成、性能評価、高速化への対応とその評価、運転動作まで含めた統合シミュレータの動作などを紹介する。

2. 背景・経過・目標

2.1 背景

ITS は基本的に情報提供によって起きる運転行動の変化から、交通流のスムーズ化、安全性の向上を目指しているところから、その効果をシミュレーションで予測するには情報提供、運転行動、交通流の 3 者の相互依存性を表現できなければならない。シミュレータの開発経過をみると 2000 年代の後半に入って情報提供即ち通信と交通流を同時に関連させてシミュレートできる計算機によるシミュレータが国内外で開発され始めている。特に欧州では国あるいは欧州共同体レベルで、こうしたシミュレータの構築が進められ ITS の環境への応用効果などが評価されている。その代表的な例として EU の 7 次フレームワークプログラム (FP7) で進められている iTETRIS プロジェクトが挙げられ、その概要については既に国際会議等で紹介されている。(例えば参考文献(1))一方、国内においても交通流を中心に通信の効果を含めた統合的なシミュレータの研究が民間の研究機関で行われている。(参考文献(2),(3))

[†] 日本自動車研究所 ITS 研究部

Japan Automobile Research Institute ITS Research Division

^{††} 早稲田大学 理工学術院

Waseda University Faculty of Science and Engineering

2.2 開発の経過

JARI/ITS 研究部では平成 19, 20 年度に ITS 標準化事業（経済省委託）の一環として、J-Safety 委員会（事務局 ITS-Japan）の効果評価分科会と連携して、様々な運転環境や運転支援の形態に適用でき、かつドライバの事故に至る認知・判断・操作の誤りを表現できる汎用的なドライバモデル（UDM:Universal Driver Model）のプロトタイプを開発した。その成果として、実際の危険交差点のモデル環境の中で UDM の事故につながる重要パラメータを選定して、それらのばらつきにより事故が発生すること、さらにパラメータ変化と事故発生の因果関係が論理的に説明できることを示した。（参考文献(4),(5)）

統合的なシミュレータの構築には、上記のドライバモデルと通信シミュレータ、交通流シミュレータの結合が必要であるが、平成 20 年度に JARI では JKA の補助を受けた(財)機械システム振興協会の委託事業（フィージビリティディ）として統合シミュレータのプロトタイプ構築を開始した。平成 20 年度には通信シミュレータ（市販レベル）として ns-2, Qualnet, Scenargie を取り上げ、代表的な ITS のシナリオのもとで出力を比較し、それらの差が生じる原因を分析した。さらに、各シミュレータがほぼ同一の結果が得られるようパラメータをそれぞれ調整し、計算時間、メモリー消費量を比較した。こうした定量的な評価に加え、交通流や電波伝搬などのシミュレータとの連携、車両ノードの追加などの容易さなど統合シミュレータへの利用の観点から評価を加え Scenargie を選定し平成 21 年度の統合化作業へと引き継がせた。（参考文献(6), (7), (8)）

2.3 開発目標

ITS における安全運転支援システムの事故防止の効果を確率的に予測するには、ドライバの特性をばらつかせながらシミュレーションを多数回実行しなければならない。特に、複数のシミュレータを同時に動作させる統合化においては計算の高速化が重要課題であるという認識を持ちつつ、統合に当たってはドライバモデル（UDM）を加えてかつ高速化を図ることを目標とした。

3. 開発内容

3.1 開発のステップ

統合シミュレータのプロトタイプは以下の 2 段階で構築された。

- Phase1：既存のシミュレータ統合用のプラットフォームを利用して交通流、通信、電波伝搬シミュレータを統合する。これにより計算速度を評価し、高速化への見通しを明らかにした。
- Phase2：高速化を図るため通信シミュレータの内部に交通流、電波伝搬、さらに

はドライバ運動動作のシミュレータを直接結合させ、統一的にイベントを管理する方法でプロトタイプを構築した。

さらに、Phase2 で構築した統合シミュレータのプロトタイプの評価としては

- 通信プロトコル部分の動作評価
- Phase1 のプラットフォーム方式シミュレータと比較した場合の高速化評価
- ドライバの運転行動まで含めた動作評価を実施した。

3.2 シミュレータ及び関連ソフトウェアの説明

本スタディを通して利用したシミュレータ及び関連ソフトウェアを以下にまとめて説明する。

(1) Phase1, Phase2 を通して利用した既存のシミュレータ

- Scenargie Base Simulator / Dot Eleven Module：通信システムシミュレータ
- MATES：東京大学で開発されたオープンソースのマルチエージェント交通流シミュレータ
- Fast Urban Propagation Module (FUPM)：高速レイトレーシング電波伝搬ライブラリ
- Integrated Simulation Platform（統合シミュレーションプラットフォーム）：通信システムシミュレータ、交通流シミュレータ、アプリケーションシミュレータを統合して動作させるための既存のシミュレーションプラットフォーム
- (Scenargie) External Simulator Connecting Module：外部シミュレータと Scenargie を連携して動作させるための接続モジュール
- (Scenargie) Trace Analyze：Scenargie のイベント情報や出力結果を効率的に解析するためのソフトウェア

(2) Phase2 で用いるために新たに開発したソフトウェアモジュール

- 簡易電波伝搬モジュール：ナイフエッジ回折を入れた 2 波モデル及び単純 2 波モデルの 2 種
- 見通し計算モジュール：任意の車両間の視認性を判断するソフトウェア。計算の効率化を図るため 4 分木の手法を導入。
- 簡易 UDM (Universal Driver Model)：外部世界の概念を用いドライバの認知のミス表現する運転者の行動モデル。今回はその一部の機能のみ実装した。
- 安全運転支援アプリケーション：近傍の車両の位置情報を車車間通信により交換

し、運転者に注意を促す。総合動作確認のために一つ角の交差点で車両を発生させるシナリオを作成

4. Phase 1 のシミュレータと動作評価

交通流シミュレータ (MATES), 通信シミュレータ (Scenargie), 電波伝搬シミュレータ (FUPM), アプリケーションシミュレータをそれぞれを結合するプラットフォームとして、既に開発されている統合シミュレーションプラットフォームを利用した。(プラットフォーム利用タイプ) その特徴は、プラットフォーム上でそれぞれのシミュレータが独立したプロセスとして動作することから、比較的自由に各シミュレータのモジュールを取り替えることが可能な点である。プラットフォーム上の全てのシミュレータは、プラットフォームにソケットを介して接続される。それぞれのシミュレータはプラットフォーム内のシミュレーションプロセスマネージャの指示にしたがって順次ワンタイムステップ毎に計算を行い結果をデータベースに送る。図 1 に Phase1 の統合シミュレータの構成を示す。

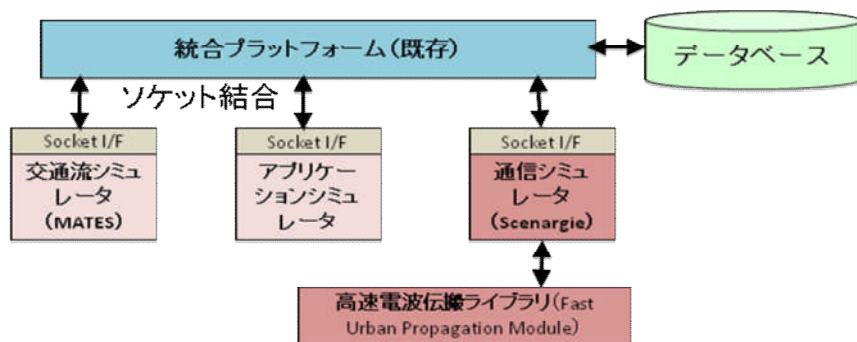


図 1 Phase1 の統合シミュレータ構成 (プラットフォーム利用タイプ)

以上の環境で、交差点及び大規模市街地での交通シナリオをのもとの通信、交通のシミュレータを動作させた場合の計算時間の分析を行った。この構成を用いると交通流、通信の各シミュレータの計算結果を交互に利用し合うこととなり、結果の同時性は確保できない。

図 2 に示す交差点シナリオ (一箇所に建物がある交差点で車両を縦横に走らせ、各車両が定期的に通信パケットを発生させる) におけるシミュレーションパラメータ及び計算時間の分析例をそれぞれ表 1, 図 3 に示す。

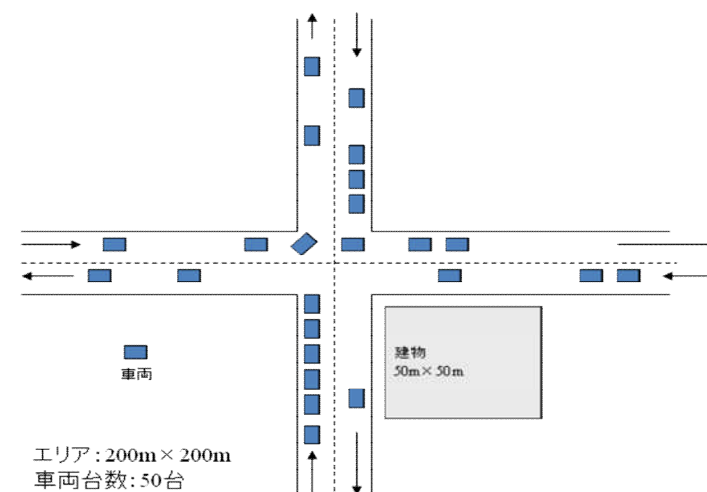


図 2 プラットフォーム利用タイプの交差点評価シナリオ例

表 1 Phase1 におけるシミュレーションパラメータ

代表パラメータ	値
シミュレーションエリア	200m×200m
車両数	定常状態でシミュレーションエリア内に約 50 台が存在
通信方式	RC-006 (Ver1.0) 準拠 (CSMA/CA, 700MHz 帯)
伝送速度	3Mbps (BPSK-OFDM)
帯域幅	10MHz
送信電力	10dBm
UDP ペイロードサイズ	80bytes
建物数	1
建物の高さ	30m
タイムステップ	100ms
電波伝搬モデル	2 波モデル/FUPM

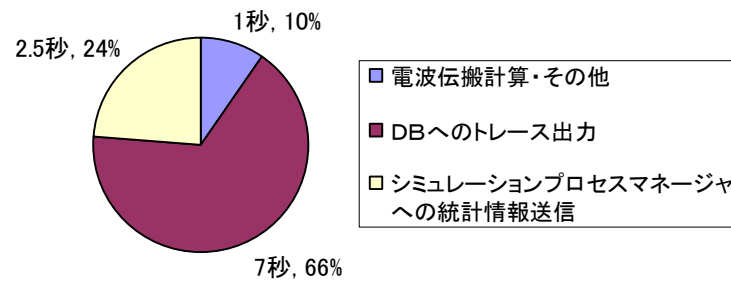


図3 計算時間分析例

図3より、計算結果をデータベース（DB）の形式でトレース出力する時間が計算時間の大きな部分を占めていることがわかる。図2の単純交差点のシナリオでは電波伝搬計算の時間割合は大きくはないが、車両及び建物が増えるとともに増大している事が別な計算例から明らかになった。

5 Phase2のシミュレータ構成

5.1 全体構成

統合シミュレーションプラットフォームを用いた統合方法では、タイムステップ毎に全車両の統計情報をシミュレーションプロセスマネージャとソケットを介して情報共有を行う必要がある。このソケット通信でやり取りする情報量は車両台数が増えるに従い増大するため、大規模なシミュレーションを行う上ではソケット通信部分が計算高速化のボトルネックになることが想定された。

そこでPhase2では、シミュレータ間の情報共有のインターフェースを見直し、交通流シミュレータ、ネットワークシミュレータ、アプリケーションシミュレータなど全てのシミュレータを直接リンクし、全てのシミュレータがメモリ空間を共有し、必要な情報について直接メモリをアクセスできるようにした。（密結合タイプ）即ち、Phase2のシミュレータでは、交通流シミュレータ（MATES）や見通し計算ライブラリ、電波伝搬ライブラリ、アプリケーションシミュレータなどは、全てScenargieの一部としてScenargieのイベントスケジューラから呼び出され動作する構成とした。（図4）こうして、数千台の規模のシミュレーションであっても短時間で計算可能な統合シミュレータの実現を図った。

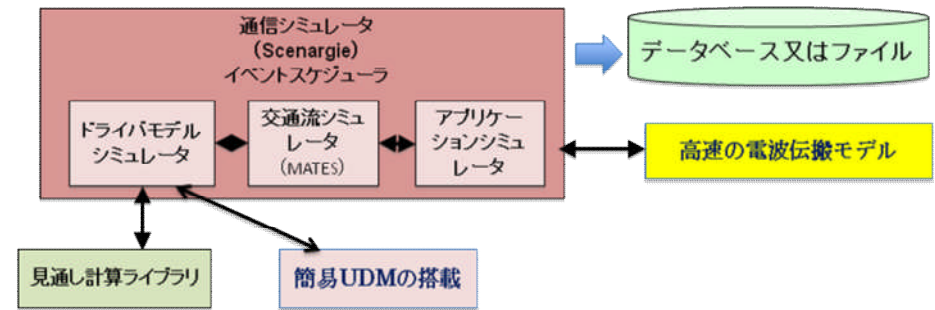


図4 Phase2のシミュレータ構成（密結合タイプ）

5.2 ドライバモデルシミュレータと見通し計算

Phase2の統合シミュレータにはドライバモデルを組み込んだ。ドライバモデルは、各ドライバが周囲の状況を認識して各自の意識のなかに構築する”外部世界モデル”に従って運転行動を行うUDM（Universal Drivers Model）という概念を採用している。図5左において、車両Aのドライバには視野外の車両Cは認識できず、自分の外部世界モデルは図5右のようになる。こうしたモデルのもとに判断・操作を行うと事故を起こす可能性が高くなる。外部世界の作成には各ドライバが自車周囲のどの車を自分の視野の中で認識しているかを決定する必要がある。このため本研究ではシミュレーションエリア内に登場する各車両を線分で結び、線分上に障害物があるか無いかを判断する見通し計算ライブラリを開発した。

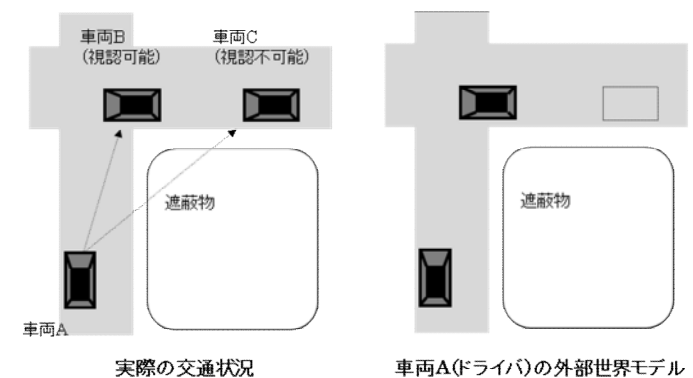


図5 UDMにおける外部世界モデルの概念

6 統合シミュレータ動作の評価

ここでは Phase2 で構築した統合シミュレータの評価について述べる。内容は

- ・ 交差点における通信（パケット到達率）の評価
 - ・ Phase1 シミュレータと比較した Phase2 シミュレータの高速性の評価
 - ・ ドライバモデルを搭載した場合の動作評価
- であり、以下、個別に説明する。

6.1 交差点における通信（パケット到達率）の評価

平成 20 年度に JARI（つくば）の模擬市街路で行われた総務省-国土交通省共同実験の一部のシナリオについて通信部分のデータをご提供いただきシミュレータの計算結果と比較した。このシナリオでは交差点で一箇所のみ建物がある場合、建物の陰にある車との通信の可能性を評価するため実験を行っており、送信-受信車両のほかに交差点周囲に妨害車両を配置してパケットの到達率を測定したものである。妨害は干渉、隠れ端末の 2 種が考えられ、1 台の車両に複数のアンテナを設置する、あるいは、パケット送信周期（通常は 100msec）を変えるなどして見かけ上の車両台数を増やして実施された。（高負荷及び低負荷の 2 シナリオ）周波数は 700MHz 帯、5.8GHz 帯が使用されたが、シミュレーションとの比較では 700MHz 帯のデータを利用した。

図 6 に本通信実験の車両配置を示す。（厳密にはこれはシミュレーション上の車両配置であって実験の配置とは異なる。）こうした配置のもとで、TX（送信車両）を交差点側に移動させながら、RX（受信車両）でのパケット受信率をシミュレーションで求め実測値と比較した。

表 2 評価用実験シナリオの条件（2008 年度共同実験データより）

	干渉車両台数	隠れ端末車両台数
シナリオ A（高負荷）	203 台	67 台
シナリオ B（低負荷）	101 台	50 台

電波伝搬モデルとしては妨害車両の発信に関しては簡易な 2 波モデルを利用し、TX-RX 間の電波伝搬は別途個別に測定されている実測値を用いた。こうしたことから、シミュレーションと実験データの比較は通信の MAC 層の機能検証の限定され、必ずしも統合シミュレータの評価には至らなかった感はあるが、一方、統合シミュレータの動作を全体的に評価するには実験のシナリオから見直さなければならないことが分かった。シミュレーションと実測データの比較結果を図 7 に示す。図 7 からはパケッ

ト妨害の程度が比較的良好にシミュレートされていることがみてとれる。

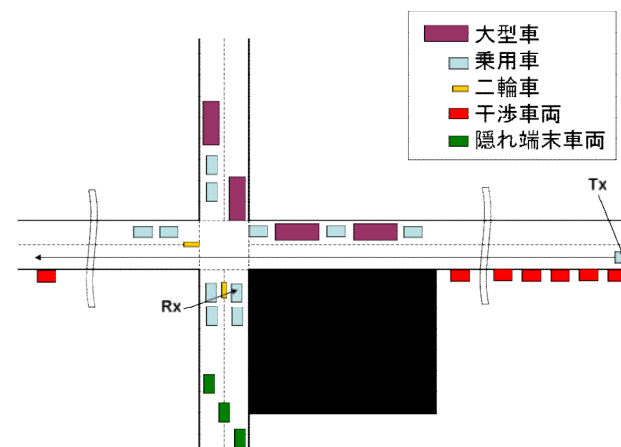


図 6 シミュレータにおける車両配置図

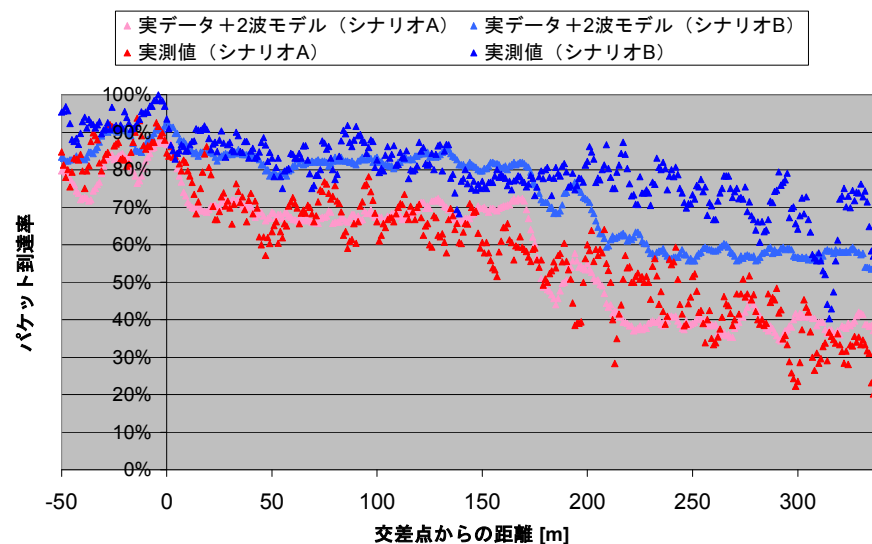


図 7 シミュレーション結果とデータの比較（パケット到達率）

6.2 Phase1, Phase2 の計算速度比較

同一のシミュレーションシナリオで Phase1, Phase2 で構築したシミュレータを動作させた場合の計算時間の比較を行う。まず、比較に当たって表 3 にそれぞれのシミュレータのオリジナルの性能をまとめる。

表 3 Phase1 と Phase 2 の統合シミュレータ特徴比較

項目	Phase 1	Phase 2
統合の仕方	プラットフォーム利用タイプ	密結合タイプ
データの共有	ソケット通信	直接リンク
データの共有の仕方	ソケット通信 データベース参照	メモリ直接参照
イベントのトレース出力	データベースへの直接書き込み	<ul style="list-style-type: none"> データベースへの直接書き込み テキストファイルへの書き出し バイナリ形式ファイルへの書き出し
時刻管理・同期	シミュレーションプロセスマネージャがそれぞれのプロセスの時刻を同期管理	Scenargie のイベントスケジューラが管理
電波伝搬モデル	FUPM	FUPM・2 波モデル・ナイフエッジモデル
見通し計算ライブラリ	FUPM の機能を利用	独自開発の見通し計算ライブラリ
ドライバモデル	なし	MATES 内に組み込み

比較のためのシミュレーションシナリオは、環境による差が明確に出るように、東京の一部の区域の地理モデルを利用し、多くの建物数、車両数を含む広域のエリアのシナリオを用いた。図 8 に地理モデルの一部、表 4 にシミュレーションシナリオデータを示す。

Phase1.Phase2 で構築したそれぞれの統合シミュレータで、通信と交通流のシミュレータを動作させた場合についてデータの書き込み方法を変化させながら計算時間の評価を行った。結果を図 9 に比較して示す。ただし、Phase1 では簡易 UDM を搭載していないので、Phase2 の簡易 UDM (見通し計算も含む) の機能は OFF した状態でシミュレーションを行った。

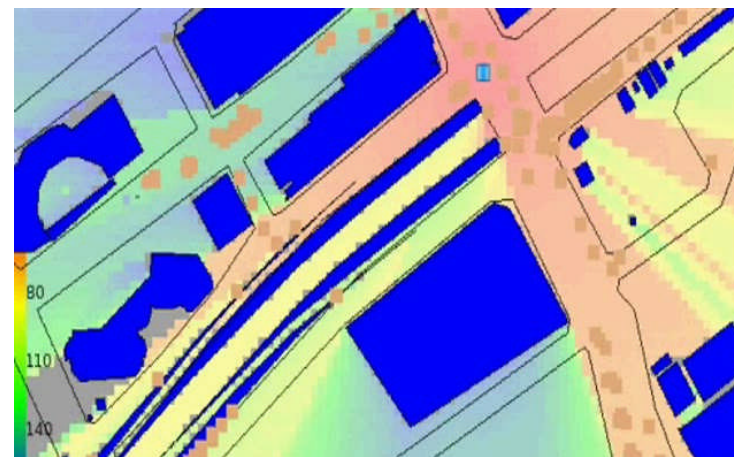


図 8 計算速度評価のために用いた地理モデル (一部を示す)

表 4 シミュレータ性能比較のためのシナリオデータ

パラメータ	値
シミュレーションエリア	2, 500m×2, 500m
車両数	定常状態でシミュレーションエリア内に約 500 台が存在
通信機	RC-006(Ver1.0) 準拠 (CSMA/CA)
伝送速度	3Mbps (BPSK-OFDM)
帯域幅	10MHz
送信電力	10dBm
UDP ペイロードサイズ	80bytes
建物のポリゴン数	10, 000 ポリゴン
建物の高さ	30m
タイムステップ	100ms
電波伝搬モデル	FUPM

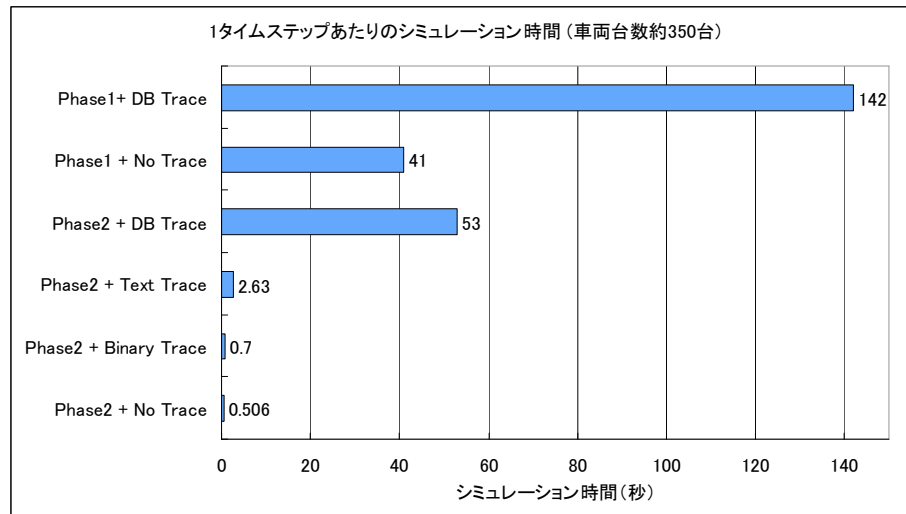


図9 Phase1, Phase2 の計算時間比較 (1タイムステップ: 100msec)

図9より、Phase 1 の環境では、1タイムステップ (100ms) のシミュレーションを行うのにデータベース形式でトレース出力した場合には142秒ほどかかっていたのに対し、Phase 2 にて統合した密結合の統合シミュレータでは、同じくデータベース形式のトレース出力で53秒とかなり高速化できていることがわかる。さらに、Phase 2 においてトレース出力をデータベース形式に代えてテキストファイルおよびバイナリ形式のファイルでそれぞれ出力させ比較した。テキストデータに比べ、バイナリ形式でのデータ出力の方が、ファイルのサイズを小さくすることができることから、ディスクアクセスに伴う処理速度を抑えることができ、また、テキストデータ出力時の整形処理が不要なことから大幅に1タイムステップあたりの処理時間を短縮することができた。

トレースデータ出力による計算負荷を除いた状態で、密結合による高速化の効果をみるために、トレース出力を停止した状態でのシミュレーションも行った。この結果、Phase 1 のプラットフォーム方式ではトレースデータを出力しない状態であっても1タイムステップあたり41秒ほどかかっていたが、Phase 2 の密結合タイプでは、1タイムステップあたり約0.5秒と、80倍近いの高速化が図れていることが確認できた。

6.3 統合シミュレータの全体動作

通信シミュレータ、交通流シミュレータ及びドライバモデルを統合させたシミュレータの動作を確認するために、図10のような優先道路(縦方向)と非優先道路(横方向)が交差する交差点で一か所のみ建物のある道路環境シナリオを作成した。ドライバモデルとしては、すべての運転者は優先、非優先に関わらず見通し内の危険な領域に他車両がないと判断した場合は減速せずに交差点を通過し、情報提供により他車両が危険域に存在すると判断した場合はそれらとの距離に応じて減速するといった簡単なものである。さらに、交差点では非優先車両が優先車両を先に通過させることとした。電波伝搬のシミュレータについてはFUPMを使用した。

図10では車車間通信による情報提供が無い場合について、非優先車両(横方向の道路を走行)が建物が障害となり接近する優先車両(縦方向の道路を走行)を認識しないまま交差点を通過している様子を示す。事故はたまたま縦横の道路を走る走行車両が遭遇した時に起こることになる。図10(右)に事故発生時のスナップショットを示している。

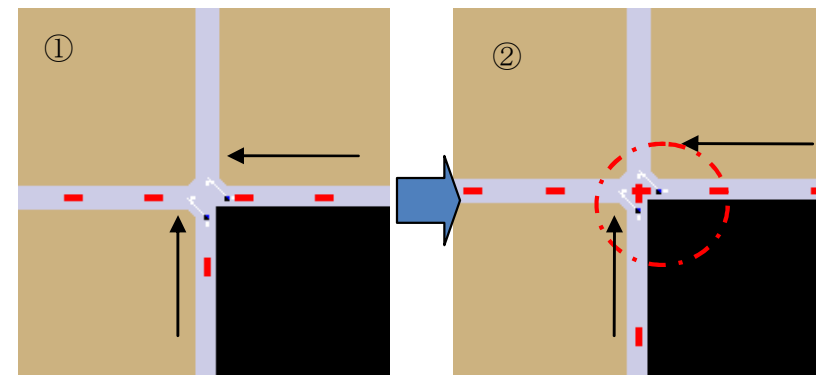


図10 交差点における事故発生時のスナップショット

車車間通信により見通し外の領域にある車両の存在が認知できると、非優先道路側の各車両ドライバは建物の陰の優先道路を走行する車両を認識し、交差点手前で減速する。こうしてシミュレータ上で事故が回避されていることが確認できた。交差点での事故回避のスナップショットを図11に示す。

このように通信、電波伝搬、交通流、ドライバモデルを統合して動作させ、情報提供による運転者の行動の変化を感覚的には妥当と思える範囲でシミュレーションすることができた。図では示さなかったが、1ステップ100msecの間で、各車両が1回づ

つ通信パケットを出し、それらが見通し外では減衰すること、さらには隠れ端末の影響でパケット衝突が起きていることなどシミュレートできていることも確認できた。

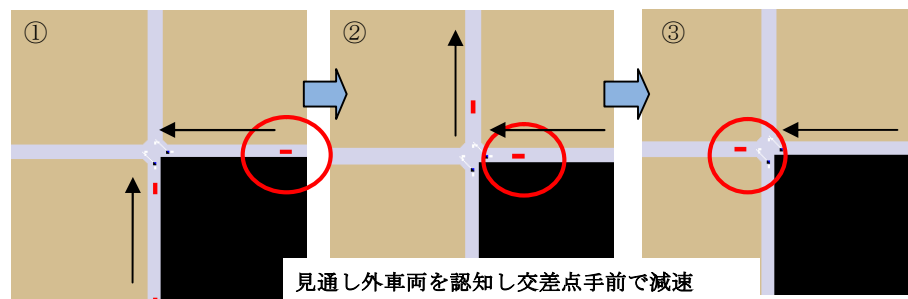


図 11 車車間通信による見通し外の車両の情報が得られた場合のスナップショット

7 まとめ

本研究の結果、複数の車両が通過する交差点において、車車間通信による安全運転支援システムの情報提供の範囲、通信における隠れ端末の影響、通信パケット衝突の発生、情報提供によるドライバーの行動の変化などが同時に動的に表現できる統合シミュレータのプロトタイプを構築することができた。

統合シミュレータの課題の一つは計算時間がかかることであるが、今回の研究によりトレースデータの保持方法、複数の個別シミュレータの結合方式などが計算時間に大きく影響するなどの知見が得られた。

試作した統合シミュレータはまだ実用化という段階ではなく、今回の構築作業を通じて明らかになった課題を解決する作業が残されている。シミュレーション結果の妥当性の検証は大きな課題の一つであり、本研究では通信機能の部分について実験データとの比較を行ったが、統合シミュレータの検証には至っていない。こうした検証を行うには標準的な検証シナリオが必要であり、今後、構築した統合シミュレータのプロトタイプを検証シナリオ作りに役立てていきたいと考えている。

ドライバーの行動まで含めた統合化を行うことで、シミュレータ構築や利用上の課題が具体化し、安全運転支援のみならず ITS 分野全般における計算機シミュレーションの利用促進に貢献できれば幸いである。

謝辞

・本研究は(財)JKAの機械振興事業補助金の交付を受けて(財)機械システム振興協会がJARIに委託した平成21年度のフィージビリティスタディとして実施したものである。

・シミュレーションの評価において、平成20年度に実施された「総務省・国土交通省共同実験」の通信データの一部を総務省殿の了解を得て利用させていただいた。

参考文献

- (1) Vineet Kumar 他 "iTETRIS: Adaptation of ITS Technologies for Large Scale Integrated Simulation" 2010IEEE/VTC Spring(2010.5)
- (2) 森,岩瀬,北岡 "予防安全システム評価シミュレータ STREET"情報処理学会 ITS 研究会 Vol.2007 No.61 2007-ITS-029 (2007.6)
- (3) 伊藤, 田所, 鈴木, 原田, 尾口, 伊藤 "車車間通信による安全運転支援システムの性能評価"情報処理学会 ITS 研究会 Vol.2007 No.90 2007-ITS-030 (2007.9)
- (4) Y.Furukawa 他 "Development of Traffic Simulator using Universal Driver Model for Safety Evaluation of ADAS" 16th ITS World Congress (2009.9)
- (5) 古川, 関 "交通シミュレータによる予防安全評価用ユニバーサルドライバモデルの開発"自動車研究第30巻第10号 (2008.10)
- (6) 大和田, 小倉, 高井, 関 "車車間通信シミュレーションの複数のネットワークシミュレータによる比較評価"情報処理学会DICOMO2009 (2009.7)
- (7) M.Takai, K.Seki "A COMPARATIVE STUDY ON NETWORK SIMULATORS FOR ITS SIMULATION IEEE802.11 MEDIUM ACCESS CONTROL (MAC) MODELS" 16th ITS World Congress (2009.9)
- (8) 関 "通信を用いた運転支援システムの統合シミュレータ (PART1通信シミュレータの評価)"自動車研究第32号第3号