

インフラレスの動的走行経路案内のための 双方向シミュレーションの実装

小原 啓志^{1,a)} 小川 紘基^{1,b)} 柳田 諒^{1,c)} 重野 寛^{1,d)}

概要：インフラレスの動的走行経路案内とは、車車間通信を利用して道路交通情報を収集し、動的に走行経路を変更する ITS アプリケーションである。動的走行経路案内を行うことで渋滞を回避し、走行時間を低減することが可能となる。このとき、通信で得られた情報から走行経路を算出する経路算出手法の他に、自身の車両の交通情報および通信で得られた他車両の交通情報を周囲の車両に提供する情報散布手法が必要である。しかし、既存の情報散布手法では、到達率、通信量等の通信性能のみに言及している。これまでの通信性能に加えて、アプリケーションにおける性能の議論も必要である。本稿では、通信シミュレータと交通流シミュレータを連携した双方向シミュレーションについて述べる。双方向シミュレーションを用いることで、情報散布手法によるアプリケーション性能の変化を分析することが可能となる。既存の情報散布手法および経路算出手法を用いて、通信性能およびアプリケーション性能について評価する。

1. はじめに

高度交通システム (Intelligent Transportation Systems : ITS) は車両、道路および人との間で情報を交換し、車社会の安全性と快適性の向上を目指すシステムである。ITS アプリケーションの一つとして動的走行経路案内がある [1]。動的走行経路案内とは、現在の走行状況から渋滞情報、事故情報などの道路交通情報を生成し、それをリアルタイムに車両が取得することによって動的に走行経路を提示するシステムである。動的走行経路案内により、渋滞を回避することが可能になり、走行時間の低減につながると考えられている。

現在、日本では VICS[2] および ITS スポットサービス [3] などの動的経路案内サービスが運用されている。これらのサービスは道路インフラを用いて情報を収集し、収集した情報をセンタで加工される。加工された情報は道路インフラや FM 電波を利用して各車両に搭載されたカーナビに配信され、動的走行経路案内を実現する。しかし、これらのインフラを用いた動的走行経路案内は、情報の収集から配信までに遅延が発生する。そのため、突発的に発生する渋滞を回避できず、走行時間の増加につながる可能性がある。

さらに、道路インフラが設置されていない地域では、動的走行経路案内を利用できないという欠点もある。

これらの問題に対処するため、インフラレスの動的走行経路案内が研究されている。センタが情報を収集および配信をするかわりに、車両同士が直接通信して情報を提供する。このようにすることで、情報の遅延が発生せず、リアルタイム性の高い動的走行経路案内を実現することができる。さらに、道路インフラが設置されていない地域においても利用することができる。以上の理由から、本研究では、インフラレスの動的走行経路案内に焦点を当てる。

インフラレスの動的走行経路案内を実現するためには、経路算出手法と情報散布手法の二つの手法が必要である。経路算出手法は、通信で得られた情報から走行時間を推測する手法である。情報散布手法は、自身の車両の情報および通信で得られた他車両の情報を周囲の車両に提供する手法である。

現在、情報散布手法について研究が行われているが、到達率、通信量等の通信性能のみに言及している。そのため、情報散布手法による、インフラレスの動的走行経路案内のアプリケーション性能の変化について分析されていない。実環境でインフラレスの動的走行経路案内を利用する場合、情報散布手法は通信性能に加えて、アプリケーション性能の評価についても行う必要がある。

この課題に対し、本稿ではインフラレスの動的走行経路案内のための双方向シミュレーションの実装について述べる。交通流シミュレータは車両の軌跡データを出力させ

¹ 慶應義塾大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Keio University
a) obara@mos.ics.keio.ac.jp
b) ogawa@mos.ics.keio.ac.jp
c) yanagida@mos.ics.keio.ac.jp
d) shigeno@mos.ics.keio.ac.jp

る．通信シミュレータは軌跡データと情報散布手法に基づいて、通信結果を出力させる、さらに、交通流シミュレータは通信結果と経路算出手法に基づき、走行経路の変更を行う．これらを繰り返すことで双方向シミュレーションを実現する．双方向シミュレーションを用いることで、情報散布手法によるアプリケーション性能の変化を分析できる．

以下、2章で経路算出手法、情報散布手法について述べるとともに、既存手法の問題点について述べる．次いで、3章で交通流シミュレータと通信シミュレータを連携させた、双方向シミュレーションを提案する．4章では、提案したシミュレーションで通信性能とアプリケーション性能の両方を評価し、考察する．最後に、5章で結論を述べる．

2. 関連研究

動的走行経路案内はインフラを用いたインフラベースの手法と、インフラを用いないインフラレスの手法に大きく大別される [4]．本研究はリアルタイム性の面から、インフラレスの動的走行経路案内に着目する．本章では、インフラレスの動的走行経路案内に必要な経路算出手法および情報散布手法について述べ、既存手法の問題点を説明する．

2.1 経路算出手法

経路算出手法は通信で得られた情報から走行時間を推測し、走行経路を算出する手法である．多くの経路算出手法では、交差点をノード、交差点間の道路をエッジとしたグラフを作成し、各エッジのコストを算出する．エッジのコストは走行時間とすることが多い．最後に、ダイクストラ・アルゴリズム等の最短経路アルゴリズムを用いて、最短時間の走行経路を算出する．

経路算出手法では、各エッジのコストを算出するアプローチが焦点となっている．V2R2[5]、VAN[6]では、各エッジにいる車両の速度からエッジのコストを算出している．MICE[7]では、各エッジにいる車両数からエッジのコストを算出している．文献 [8]、[9]では、過去のエッジの通過時間からエッジのコストを算出している．近年では、他の車両の走行経路を考慮してエッジのコストを算出する手法が多く提案されている．[10][11][12]．これらは、混雑していない道路への誘導によって生じる渋滞を抑制することを目的としている．

2.2 情報散布手法

情報散布手法は、自身の車両の情報および通信で得られた他車両の情報を周囲の車両に提供する手法である．最も単純な情報散布手法はフラッディングである．フラッディングでは、初めて受信したパケットを全て中継する．しかし、車両数が増えると通信性能が低下する．これは通信量が増大し、帯域の圧迫やパケット衝突が発生するためである．この問題はブロードキャストストームと呼ばれてい

る [13]．ブロードキャストストームを解消するために、中継によるオーバーヘッドを削減する情報散布手法は重要である．さらに、都市環境においては、建物によって電波が遮断され、車両間距離が短くても情報を伝搬できないことがある．この問題はシャドウイングと呼ばれている [14]．

情報散布手法では、次ホップの中継車両を決めるための中継アプローチが焦点となっている．中継アプローチに基づき、送信車両ベース手法と受信車両ベース手法の二つに大別される [15]．送信車両ベース手法は送信車両や中継車両が次ホップの中継車両を選択する．送信車両ベースの代表的な手法として V-TRADE[16] が挙げられる．送信車両は送信車両の速度と相対位置ベクトルとの角度差に基づいて中継車両を選択することでシャドウイングの影響を低減する．RNABR[17] は道路網構造に基づいて道路を分類し、道路に応じて中継車両の選択方法を変更することで、シャドウイングの影響やホップ数の低減を図っている．受信車両ベース手法は受信車両が自律的に中継を判断することで中継制御を行う．カウンタ型フラッディング (CB-Flooding) [18] は受信車両ベースの代表的な手法として知られている．受信車両はランダムな中継待ち時間を設定し、中継待ち時間後に中継を行う．このとき、他車両からの中継パケットを一定回数以上受信した場合、中継を中止する．DDT[19] は中継車両との距離に応じた中継待ち時間の設定を行うことで、ホップ数や伝搬遅延の低減を図っている．

2.3 既存手法の問題点

既存の情報散布手法の多くは、具体的なアプリケーションに限定して開発しておらず、通信性能のみの言及にとどまっている．通信性能の例として、到達率や通信量などが挙げられる．インフラレスの動的走行経路案内では、情報散布手法を用いて情報を取得し、得られた情報に基づいて、経路算出手法を利用して走行経路を算出する．情報散布手法により、取得した情報の内容が変化する．そのため、同じ経路算出手法を利用しても、情報散布手法によってアプリケーション性能が変化する可能性がある．以上から、情報散布手法は通信性能だけでなく、アプリケーション性能についても分析し、議論する必要がある．

情報散布手法によるアプリケーション性能の分析を行うためには、通信シミュレータと交通流シミュレータとの連携が必要不可欠である．通信シミュレータにおいては、交通流シミュレータから出力される車両の軌跡データを用いて、情報散布手法を実行する必要がある．交通流シミュレータにおいては、通信シミュレータから出力される通信結果に基づいて、経路算出手法を実行し、走行経路を変更する必要がある．これら二つの動作を周期的に行うことで、情報散布手法によって交通流シミュレータの挙動を変化させ、アプリケーション性能を分析することが可能になる．

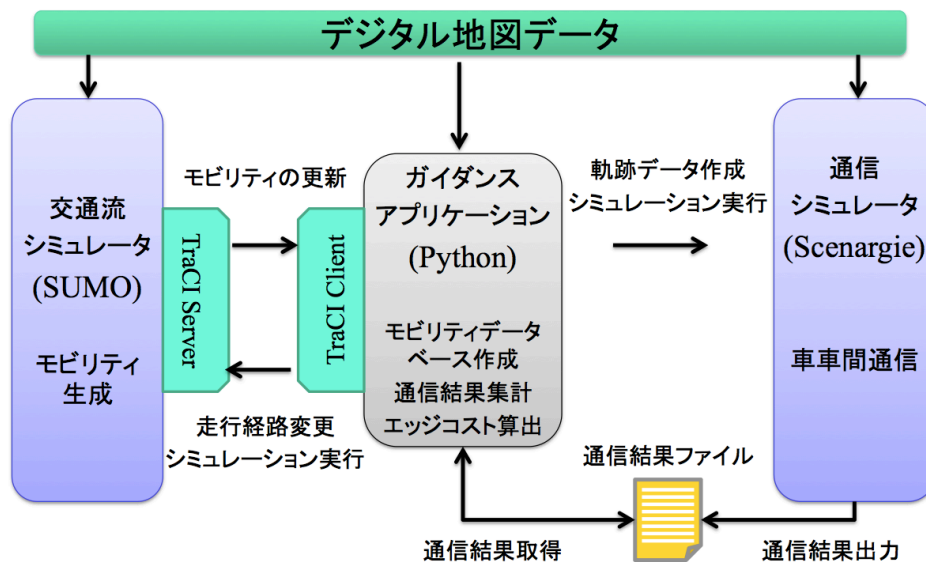


図 1 双方向シミュレーションのシステム構成図

3. 双方向シミュレーションの実装

本章では、通信シミュレーションと交通流シミュレーションを連携させた、双方向シミュレーションを提案する。

3.1 システム構成

図 1 に双方向シミュレーションのシステム構成を示す。本システムでは、交通流シミュレータ、ガイダンスアプリケーション、通信シミュレータの主に 3 つのモジュールから構成される。さらに、現実的な道路環境で行うため、各モジュールは共通のデジタル地図データを用いる。

交通流シミュレータとして SUMO[20] を用いた。SUMO はフリーで提供されており、ITS 研究分野で広く使われている。他車両との衝突や信号を考慮したモビリティモデルを実装しているため、現実的なモビリティを生成できる。また、SUMO は TraCI (Traffic Control Interface) [21] が実装されている。TraCI を利用すると、SUMO は Server として実行され、待機状態となる。このとき、外部のアプリケーションは TCP ソケット通信を利用し、Client として SUMO の中断やモビリティの取得を行うことができる。本稿では、Client となるアプリケーションをガイダンスアプリケーションとし、Python 言語のプログラムを作成した。SUMO は python 言語で書かれた TraCI API が多く用意している。

通信シミュレータとして Scenargie[22] を用いた。Scenargie は商用のシミュレータである。車車間通信で標準化されている IEEE802.11p のモデルが実装されており、建物によるシャドウイングを考慮した電波伝搬を再現することができる。また、オープンソースであり、情報散布手法を容易に開発できる利点もある。Scenargie は SUMO のように、外部のアプリケーションと相互通信できる仕組み

は実装されていない。したがって、ガイダンスアプリケーションから通信結果を直接取得することができない。そのため、ガイダンスアプリケーションはコマンドを用いて、Scenargie を実行し、通信結果をファイルとして出力させる。その後、ガイダンスアプリケーションは通信結果ファイルを読み込み、モビリティデータベースに基づいて、エッジコストを算出し、再短時間の走行経路を求める。求めた走行経路を TraCI を通じて SUMO に反映させる。

以上のシステムを利用することで、交通流シミュレータと通信シミュレータを連携することができ、情報散布手法によって交通流シミュレータの挙動を変化させることができる。したがって、情報散布手法によるアプリケーション性能の変化の分析が可能となる。

3.2 ガイダンスアプリケーションの詳細

本節では、前節で説明したガイダンスアプリケーションの詳細について説明する。ガイダンスアプリケーションは交通流シミュレータと通信シミュレータを連携させるための役割を担っており、SUMO のモビリティデータと Scenargie の通信結果を相互に反映させる必要がある。Algorithm1 にガイダンスアプリケーションの疑似コードを示す。事前に SUMO を TraCI Server として実行し、待機状態になっていることを前提としている。最初に TraCI Client として SUMO に接続し、実行制御ができるようにする。シミュレーション時刻 t を設定し、基本的にはシミュレーション時間に達するまで、シミュレーション時刻までの SUMO の実行 (4 行目)、モビリティデータベースの取得および更新 (5, 6 行目)、シミュレーション時刻の更新 (16 行目) を繰り返す。モビリティデータベースには以下の項目をまとめたリストである。

- シミュレーション時刻

- 車両 ID
- 位置座標
- 速度
- 走行しているエッジ ID

以上の動作に加えて、一定の周期毎に Scenargie を実行し、通信結果を用いて走行経路を変更する(7-15行目)。まず、Scenargie を実行するのに必要な軌跡データを、モビリティデータベースから作成する。軌跡データは以下の項目をまとめたリストである。

- シミュレーション時刻
- 車両 ID
- 位置座標

このとき、位置座標は修正を行う必要がある。SUMO の原点と Scenargie 原点が異なるからである。軌跡データを用いて情報散布手法を実装した Scenargie を実行し、通信結果をファイルとして出力させる。通信結果は以下の項目をまとめたリストである。

- 受信車両 ID
- 送信車両 ID
- パケット生成時刻

通信結果を用いて、現在走行している各車両に対して走行経路案内を行う(10-13行目)。自車両が受信した送信車両のモビリティデータを、パケット生成時刻に基づいてモビリティデータベースから抽出する。抽出したデータから経路算出手法を用いてエッジコストを算出し、走行経路変更を行う。このとき、道路長や制限速度等、エッジコスト算出に必要な道路データは TraCI で取得可能である。また SUMO 内でダイクストラ法などの最短経路アルゴリズムが実装されている。そのため、エッジコストを TraCI を通じて送信することで、最短時間経路が算出される。

以上のアルゴリズムを行うことで、SUMO の軌跡データを Scenargie に反映させ、Scenargie の通信結果から走行経路を変更することで SUMO に反映させる。すなわち、SUMO と Scenargie を連携させた双方向シミュレーションを実行することが可能となる。

4. シミュレーション評価

本章では、前章で提案した双方向シミュレーションを実行し、通信性能およびアプリケーション性能の評価および考察を行う。

4.1 シミュレーション環境

本稿では、アメリカのマンハッタン地区の 2km × 5km の Open Street Map[23] を用いる。図 2 に道路モデルを示す。この地図上で、前章で提案した双方向シミュレーションを実行した。図 3(a) に SUMO を実行したときの様子を示す。各交差点に信号を設置しており、現実的なモビリティを再現している。また、一部の道路は一方通行となっ

Algorithm 1 Guidance Application

```
Require: do SUMO as TraCI Server
1: connect to SUMO as TraCI Client
2:  $t \leftarrow 0$ 
3: while  $t \leq SIMULATION\_TIME$  do
4:   simulate SUMO to  $t$ 
5:   obtain mobility data from SUMO
6:   add mobility data to mobility database
7:   if  $t = 0 \bmod ROUTE\_UPDATE\_INTERVAL$  then
8:     make trace data from mobility database
9:     simulate Scenargie with trace data and method of data dissemination (output result file)
10:    for each vehicle running at  $t$  do
11:      extract data from mobility database with result file
12:      calculate edge costs from extracted data
13:      change route according to calculated edge costs
14:    end for
15:  end if
16:   $t \leftarrow t + STEP$ 
17: end while
18: disconnect from SUMO
```

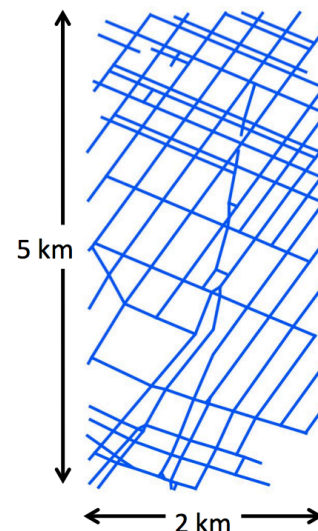
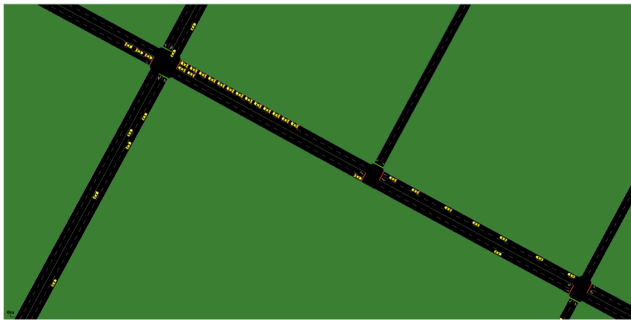


図 2 シミュレーション道路モデル (マンハッタン地区)

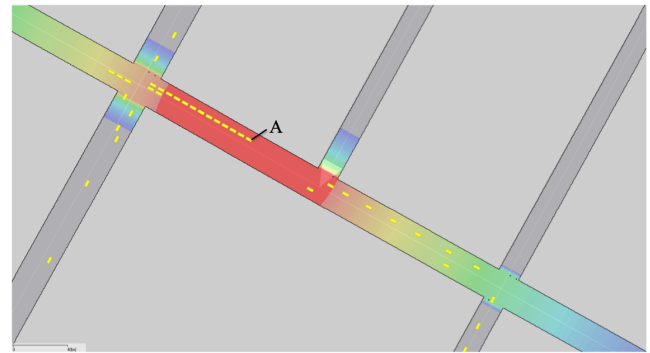
ている。さらに、道路上に沿った電波伝搬を再現可能な ITU-R P.1411[24] を電波伝搬モデルに用いることで、都市部における伝搬特性を考慮したシミュレーションを行なった。図 3(b) に Scenargie を実行したときの電波伝搬の様子を示す。電波伝搬は車両 A が送信した場合の電波強度を示す。

4.2 シミュレーション条件

主なシミュレーション条件を表 1 に示す。通信規格は車車間通信むけ 5.9GHz 帯の IEEE802.11p を利用する。通信パラメータの値は、ITS シミュレーション評価シナリオ [25] における標準的な値を採用する。送信出力は 20dBm とした。シミュレーションにおける最大通信可能距離はおよそ 400m である。各車両はシミュレーションエリア内に流入後、出発地から最低 1km 離れた目的地をランダムに設



(a) 交通流シミュレーション



(b) 通信シミュレーションと電波伝搬

図 3 双方向シミュレーションの実行状況

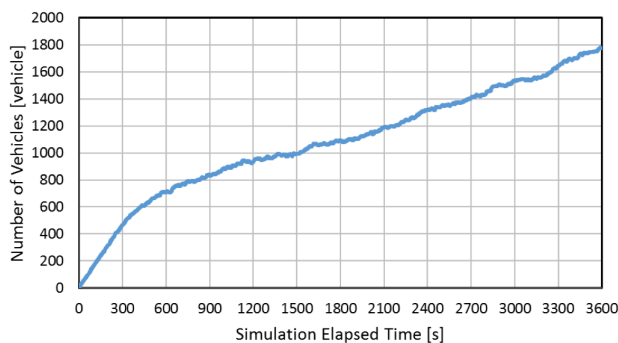


図 4 エリア内の車両数の時間推移 (100veh/min)

定する．目的地到着後，各車両は流出する．後述する各シナリオで，車両の流入のタイミング，出発地，目的地の設定は共通である．車両流入量は 100veh/min とし，シミュレーション時間は 3600 秒とした．図 4 に，動的経路走行案内を行わなかったときの車両台数の時間推移を示す．このように，流入流出モデルではシミュレーション内の車両台数が時間とともに変化する．車両が十分に流れるまでの時間を考慮し，1800 秒，2100 秒，2400 秒，2700 秒，3000 秒，3300 秒で動的走行経路案内アプリケーションを行う．その際，60 秒間の軌跡データを用いて，Scenargie を実行し．通信結果を用いて走行経路の変更を行う．例えば 1800 秒の場合，1740 秒から 1800 秒までの軌跡データを用いて Scenargie を実行する．Scenargie では，各車両が 60 秒間の間にパケットを一回送信し，中継を利用して情報を散布する．送信するタイミングはランダムである．

比較対象として，以下のシナリオで評価し，考察を行う．

- 最短距離経路の利用 (動的走行経路案内なし)
- CB-Flooding を利用した動的走行経路案内
- DDT を利用した動的走行経路案内

CB-Flooding のカウンタ数は 5 とする．情報散布手法を利用したシナリオの場合，経路算出手法として，Greenshield's Model[26] を用いる．Greenshield's Model は車両線密度から速度を推定し，エッジコストを算出する．エッジ i におけるコスト T_i を以下の式で算出する．

表 1 シミュレーション条件

Communication	
Simulator	Scenargie 2.0 [22]
Standard	802.11p
Band Frequency	5.9 GHz
Bandwidth	10 MHz
Modulation Method	OFDM (QPSK 1/2)
Transmission Rate	6.0 Mbps
Transmission Power	20 dBm
Detection Power Threthold	-85 dBm
Propagation Model	ITU-R P.1411 [24]
Data Packet Size	500 byte
Transmission of Range R	400 m
Min Waiting Period	0.1 sec
Max Waiting Period	1.0 sec
Vehicular Traffic	
Simulator	SUMO 0.24 [20]
Vehicular Traffic Flow	100 vehicle/min
Max Speed v_{max}	13.9 m/sec (50 km/h)
Max Density d_{max}	134 veh / km
Green Time Duration	31 sec
Number of Lanes	2 lanes (oneway) 4 lanes (twoway)
Road Width	16.5m (oneway) 23.5m (twoway)

$$T_i = L_i / v_i \quad (1)$$

$$v_i = v_{max}(1 - d_i / d_{max}) \quad (2)$$

$$d_i = N_i / L_i l_i \quad (3)$$

v_i は推定速度である． v_{max} は制限速度である． d_{max} は最大車両線密度であり，最小車両間距離と車両の長さから算出した． d_i は推定車両線密度であり，車両数 N_i ，道路長 L_i ，車線数 l_i から算出する．このとき， N_i は Scenargie で受信することのできた車両数とする．そのため，車両により， N_i の値が異なり， T_i の値が変化する．同様の理由で，情報散布手法により， T_i の算出精度が変化する．

通信性能の評価指標はパケット到達率，冗長度とした．パケット到達率 (Packet Delivery Ratio: PDR) はパケッ

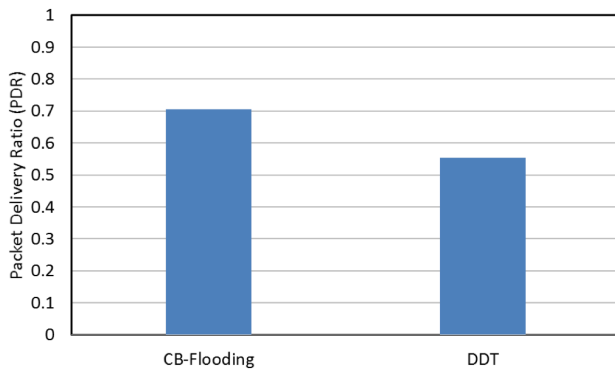


図 5 パケット到達率と情報散布手法の関係 (100veh/min)

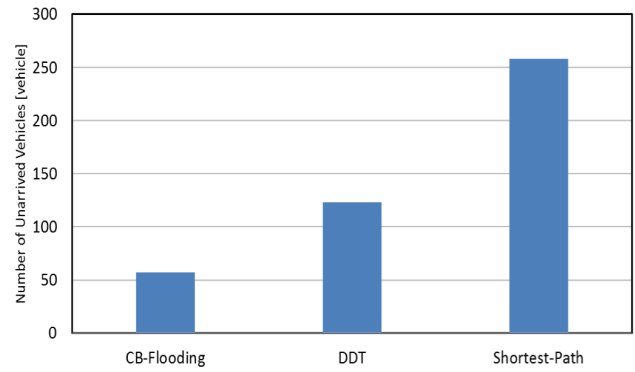


図 7 未到着車両数とシナリオの関係 (100veh/min)

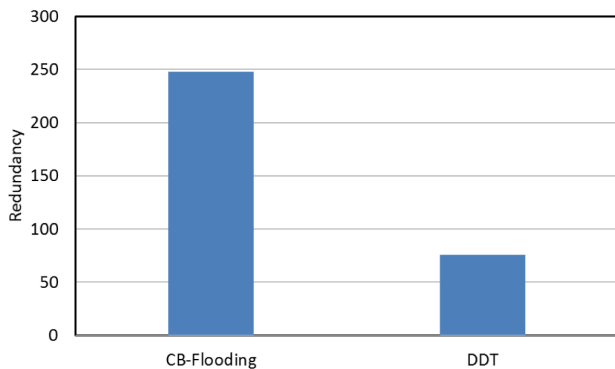


図 6 冗長度と情報散布手法の関係 (100veh/min)

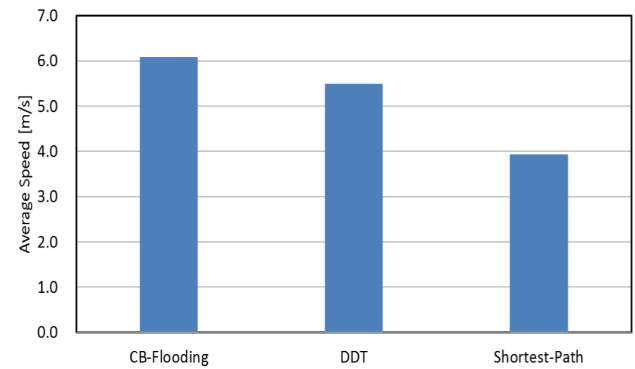


図 8 平均速度とシナリオの関係 (100veh/min)

ト送信時におけるエリア内の車両数に対する、パケットを受信した車両数の割合を表す。冗長度 (Redundancy) は送信車両が送信したソースパケット 1 つあたりの中継回数を表す。パケット到達率、冗長度はそれぞれプロトコルの信頼性、効率性を表す指標となる。

アプリケーションの評価指標は未到着車両数、平均速度とした。評価対象は 1800 秒から 2400 秒までに出発した車両を対象とする。車両数はおよそ 1000 台である。未到着車両数は評価対象のうち、シミュレーション時間内に目的地に到着できなかった車両の数を示す。平均速度は評価対象の総走行距離を総走行時間で割った値を示す。未到着車両についてはシミュレーション終了時までの走行距離と走行時間を用いる。未到着車両数、平均速度は交通流の効率性を示す指標となる。

4.3 通信性能の評価と考察

図 5, 図 6 にそれぞれパケット到達率, 冗長率を示す。CB-Flooding は DDT よりも高い到着率を示している。DDT は距離に基づいた中継制御を行っているため、建物によるシャドウイングの影響を受け、到達率が低下したと考えられる。一方、DDT は CB-Flooding よりも低い冗長率を示している。CB-Flooding はランダムな待ち時間を設定している。そのため、中継車両との距離が短い受信車両の中継が冗長になる可能性があることが要因だと考えられる。

4.4 アプリケーション性能の評価と考察

図 7, 図 8 にそれぞれ未到着車両数, 平均速度を示す。Flooding, DDT を利用した動的走行経路案内は、動的走行経路案内を行っていない最短距離走行経路よりも低い未到着車両数を示した。動的走行経路案内を行うことで、渋滞が発生している道路を回避し、空いている道路に車両を誘導できたことが要因だと考えられる。特に CB-Flooding を利用した動的走行経路案内は、DDT を利用したときよりも低い到着車両数を示している。CB-Flooding は DDT と比べてパケット到着率が高く、経路算出の精度向上につながったことが要因だと考えられる。平均速度についても、同様の理由で、CB-Flooding を利用した動的走行経路案内が最も高い平均速度を示したと考えられる。これらの結果から、パケット到着率とアプリケーション性能には相関関係があり、情報散布手法により、アプリケーション性能が変化することが分かった。

5. おわりに

本稿では、情報散布手法による、ITS アプリケーション性能の変化の分析を目的として、交通流シミュレータと通信シミュレータを連携した双方向シミュレーションを提案した。交通流シミュレータで得られた軌跡データを利用し、情報散布手法を実装した通信シミュレータを実行する。通信シミュレータで得られた通信結果を利用し、経路算出手

法に基づいて走行経路を求め、交通流シミュレータに反映させる。これらを周期的に行うことで、通信性能とアプリケーション性能との相関が分かり、情報散布手法によるアプリケーション性能の変化の分析が可能となる。提案した双方向シミュレーションを実道路地図を用いて評価した結果、CB-Floodingを用いた動的走行経路案内は、DDTを用いた場合と比べて、高いアプリケーション性能が得られたことが分かった。これらの結果から、情報散布手法によってアプリケーション性能が変化することが確認できた。今後、車両流入量や情報散布手法などを変えた様々シナリオで評価を行い、インフラレスの動的走行経路案内に必要な通信性能を分析する予定である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 25280032 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] d'Orey, P.M. and Ferreira, M.: ITS for Sustainable Mobility: A Survey on Applications and Impact Assessment Tools, *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 15, No. 2, pp. 474–493 (2014).
- [2] 一般財団法人 VICS センター: Vehicle Information and Communication System, 入手先 http://www.vics.or.jp/known/about/pdf/vics_pamphlet.j.pdf (参照 2015-11-5)。
- [3] 国土交通省: ITS スポットサービス, 入手先 http://www.mlit.go.jp/road/ITS/jhtml/spot_dsrc/ (参照 2015-11-5)。
- [4] Khanjary, M. and Hashemi, S.M.: Telematics and Information Systems (EATIS), 2012 6th Euro American Conference on, *Route guidance systems: Review and classification*, pp. 1–7 (2012).
- [5] Ding, J.-W. and Wang, C.-F. and Meng, F.-H. and Wu, T.-Y.: Real-time vehicle route guidance using vehicle-to-vehicle communication, *Communications, IET*, Vol. 4, No. 7, pp. 870–883 (2010).
- [6] Wenping Chen and Sencun Zhu and Deying Li: VAN: Vehicle-assisted shortest-time path navigation, *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2010 IEEE 7th International Conference on*, pp. 442–451 (2010).
- [7] Zongjian He and Jiannong Cao and Tao Li: MICE: A Real-time Traffic Estimation Based Vehicular Path Planning Solution Using VANETs, *Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2012 International Conference on*, pp. 172–178 (2012).
- [8] Lin Xiao and Lo, H.K.: Adaptive Vehicle Navigation With En Route Stochastic Traffic Information, *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 15, No. 5, pp. 1900–1912 (2014).
- [9] 鈴木理基, 徳田大誠, 重野寛: 動的経路案内のための右左折を考慮した道路コストの利用法, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム, pp. 1069–1076 (2012).
- [10] Pei-Jin He and Kuo-Feng Ssu and Yu-Yuan Lin: Sharing trajectories of autonomous driving vehicles to achieve time-efficient path navigation, *Vehicular Networking Conference (VNC), 2013 IEEE*, pp. 119–126 (2013).
- [11] Ruilin Liu and Hongzhang Liu and Daehan Kwak and Yong Xiang and Borcea, C. and Nath, B. and Iftode, L.: Themis: A participatory navigation system for balanced traffic routing, *Vehicular Networking Conference (VNC), 2014 IEEE*, pp. 159–166 (2014).
- [12] Pan, J. and Popa, I.S. and Zeitouni, K. and Borcea, C.: Proactive Vehicular Traffic Rerouting for Lower Travel Time, *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, Vol. 62, No. 8, pp. 3551–3568 (2013).
- [13] Tseng, Y.-C., Ni, S.-Y., Chen, Y.-S. and Sheu, J.-P.: The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network, *Wireless Networks*, Vol. 8, No. 2, pp. 153–167 (2002).
- [14] Hosseini Tabatabaei, S., Fleury, M., Qadri, N. and Ghanbari, M.: Improving Propagation Modeling in Urban Environments for Vehicular Ad Hoc Networks, *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 12, No. 3, pp. 705–716 (2011).
- [15] Daraghmi, Y.-A., Yi, C.-W. and Stojmenovic, I.: Forwarding methods in data dissemination and routing protocols for vehicular Ad Hoc networks, *Network, IEEE*, Vol. 27, No. 6, pp. 74–79 (2013).
- [16] Sun, M.-T., Feng, W.-C., Lai, T.-H., Yamada, K., Okada, H. and Fujimura, K.: GPS-based message broadcasting for inter-vehicle communication, *Parallel Processing, International Conference on*, pp. 279–286 (2000).
- [17] 小原啓志, 赤松諒介, 重野寛: 自動車アドホックネットワークにおける道路の接続性を利用したブロードキャストプロトコル, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, No. 5, pp. 174–181 (2014).
- [18] Williams, B. and Camp, T.: Comparison of Broadcasting Techniques for Mobile Ad Hoc Networks, *Proc. ACM MobiHoc '02*, pp. 194–205 (2002).
- [19] Sun, M.-T., Feng, W.-C., Lai, T.-H., Yamada, K., Okada, H. and Fujimura, K.: GPS-based message broadcast for adaptive inter-vehicle communications, *Vehicular Technology Conference, IEEE-VTS Fall VTC 52nd*, pp. 2685–2692 (2000).
- [20] Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M. and Bieker, L.: Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility, *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, Vol. 5, No. 3&4, pp. 128–138 (2012).
- [21] Wegener, Axel and Piórkowski, Michał and Raya, Maxim and Hellbrück, Horst and Fischer, Stefan and Hubaux, Jean-Pierre: TraCI: An Interface for Coupling Road Traffic and Network Simulators, *Proceedings of the 11th Communications and Networking Simulation Symposium*, pp. 155–163 (2008).
- [22] 大和田泰伯, 前野誉, 金田茂, 久永良介, 高井峰生: Scenargieを用いた ITS シミュレーション, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2008) シンポジウム, pp. 233–234 (2008).
- [23] H. Mordechai and W. Patrick: OpenStreetMap: User-Generated Street Maps, *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 7, No. 4, pp. 12–18 (2008).
- [24] ITU-R P.1411-5: Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz (2007).
- [25] 財団法人日本自動車研究所: ITS 通信シミュレーション評価シナリオ (Ver. 1.2) (オンライン), 入手先 [http://www.jari.or.jp/Portals/0/resource/pdf/H23-simyu/\(Ver1.2\)20131010.pdf](http://www.jari.or.jp/Portals/0/resource/pdf/H23-simyu/(Ver1.2)20131010.pdf) (参照 2015-11-5).
- [26] Greenshields, B. D.: A study in highway capacity, Vol. 14, No. 1, pp. 448–477 (1935).