

マルチエージェントシミュレーションを用いた災害時の車車間通信による情報伝播モデルの提案*

Suppose on Information Diffusion Model of Multi-Hop Wireless Ad-Hoc Network Using Inter-Vehicle Communications Based on Multi-Agent Simulation During Disaster *

室井寿明**・福田敦***

By Toshiaki MUROI**・Atsushi FUKUDA***

1. はじめに

情報通信の確保は、全ての災害対応の前提である。災害により被災地を発着とする通信需要は短時間で急激な増加を招くとともに、通信センターである基地局や、通信設備、発電施設自体が被災し、情報途絶や遅れが発生する可能性があり、災害対応の遅れや被害拡大につながる恐れがある。これに対し、我が国では通信施設を含むインフラ施設の耐震性補強や、公共機関を中心に衛星電話等の整備が相当に進められてきた。しかしながら、いかなる災害にも絶対に耐えうる補強を行うことは経済的にも物理的にも困難である。そこで、災害時でもインフラ施設と独立して通信用の電源を利用でき、かつ基地局などの通信センターを経由せずとも情報通信が可能な車車間通信による情報通信ネットワークの構築が挙げられる。

ここで、どのような災害時に何の情報が必要とされるか、その情報はどの程度の速さで求められるか、などの議論は極めて重要であると考え、本稿では各車両が独立して車車間通信によって通信を行った場合に、全体として情報がどのような振る舞いを起こすのか、その現象の解析に焦点を当てて議論することを目的とする。より具体的には、個々の車両をエージェントと見なし、単純で同じルールを共有した多数のエージェントが車車間通信によって情報を相互に伝達すると考え、マルチエージェントシミュレーションによる情報伝播モデルを提案する。そして車載器の通信能力や交通状況に応じて各エージェントが自律的に通信プロトコルを変化させた場合に、情報通信ネットワークがどのように構築されるか、また情報がどのように伝播するかを評価する。

*キーワード：交通行動分析、交通情報

**学生員、修（工）、日本大学大学院理工学研究科

(千葉県船橋市習志野台7-24-1-739D、
TEL047-469-5355、FAX047-469-5355)

***正員、工博、日本大学理工学部社会交通工学科

(千葉県船橋市習志野台7-24-1-739D、
TEL047-469-5355、FAX047-469-5355)

2. 車車間通信の特性

車車間通信の実験は機械・電気電子の分野で数多く行われており、それらの報告に基づいて車車間通信の特性を以下のように整理した。

- ・ 通信機器によって通信速度や通信可能範囲、同時接続可能数、接続に要する時間などが異なる
- ・ 無線LANで通信を行う場合は干渉問題がある
- ・ 車間距離（通信距離）および同時接続数に比例してパケット送受信のエラーが発生しやすくなる
- ・ 一度に送受信するデータ量、あるいはある単位時間におけるデータ送受信回数に比例してパケット送受信のエラーが発生しやすくなる
- ・ 通信速度やパケット送受信エラーは相対速度、通信距離、道路環境などの影響を受け、その影響の大きさは通信機器によって異なる

車車間通信として既に導入されているか、または実験が進められているものとしては、①見通し型通信と②放送型通信に大別できる。見通し型通信では赤外線、ミリ波、DSRC (ETC) が挙げられる。この通信の特徴としては車両間に遮蔽物が存在しない状況での利用が前提となっており、専用周波数を用いているために他システムとの干渉がなく、通信エラー発生確率が極めて低い。一方放送型通信では、VHF波、マイクロ波、無線LANが挙げられる。これらの無線の特徴としては車両間の遮蔽物があっても通信可能で、通信範囲が見通し型通信と比較して広い。しかし、専用周波数を用いているわけではなく、他システムとの干渉を受け、場合によっては通信エラーがしばしば発生する。

また、いまだに車車間通信として導入されているわけではないが、研究段階として車車間通信に搭載可能であると言われている無線ネットワーク技術もあり、ここでは、①主に1対1（例えば道路上の端末と、ある1台の車両のみでの1対1）の利用を前提としている短距離無線と、②1対nでの利用を前提としている無線PAN/無線LANに大別した。

本稿で考慮する車車間通信は、

I) 見通し型通信であり、かつ1対1での利用を前提とし

ており短距離無線であるDSRC

II) 放送型通信であり、かつ1対nでの利用を前提として
いる無線LAN
とした。

3. マルチエージェントによる情報伝播モデル

以上の車車間通信の特性を踏まえて、本稿ではマルチ
エージェントによる情報伝播モデルを以下のフェーズに
分割して考える。

(1) 接続フェーズ

今、微小時間 Δt において、あるリンク $Link_a$ 上を走行
している車両 V_i を考える。 V_i の車車間通信の接続可能範
囲を $L[m]$ とした時、 $L[m]$ 内に他の車両 V_j が存在していた
場合、 V_i は V_j と接続を試みようとし、接続開始パケット
 P_{cij} を送信する。

$$if \quad | V_i(t)[x_i, y_i, h_i] - V_j(t)[x_j, y_j, h_j] | \leq L_m$$

$$R_{cij}(t) = R_{cij}(t-1) + C_m$$

with probability $1 - \varepsilon_m$

$$R_{cij}(t) = 0$$

with probability ε_m

ここで、エラー発生確率 ε_m は通信機器および車間距
離など通信環境によって変化することが分かっており、
下記のように示すことができる。

$$\varepsilon_m = f(V_i(t)[x_i, y_i, h_i] - V_j(t)[x_j, y_j, h_j],$$

$$link_a, \text{ property of Mode}, | V_i(t)[v_i] - V_j(t)[v_j] |)$$

$$C_m \leq 1$$

これ以降にエラーが発生した場合は、通信エラーと
見なして接続フェーズからやり直すこととする。なお、
通信ネットワークに参加するまでの時間は通信機器によ
って異なることが指摘されている。ここでは定数 C_m が
接続可能になるまでの時間として表現した。ここで、

$$| V_i(t)[x_i, y_i, h_i] - V_j(t)[x_j, y_j, h_j] | : V_i \text{ と } V_j \text{ の車間距離}$$

$$R_{cij}(t) : V_i \text{ から } V_j \text{ に送信された接続開始パケット総量}$$

$link_a$: ある微小時間 Δt 中に V_i が走行しているリンクa

C_m : 通信機器mが Δt に送信できる接続開始パケット量
である。

(2) 応答フェーズ

接続フェーズで P_{cij} を受信した V_j は、 V_i に対して接続パ
ケットを受け取った旨である応答パケット P_{cji} を送信す

る。

$$if \quad R_{cij}(t) = 1 \quad and$$

$$| V_i(t)[x_i, y_i, h_i] - V_j(t)[x_j, y_j, h_j] | \leq L_m$$

$$R_{cji}(t) = R_{cji}(t-1) + C_m$$

with probability $1 - \varepsilon_m$

$$R_{cji}(t) = 0$$

with probability ε_m

ここで、

$$R_{cji}(t) : V_j \text{ から } V_i \text{ に送信された応答パケットの総量}$$

である。以上の接続フェーズと応答フェーズを繰り返し、
ある時刻において下記の条件を満たした場合、車両 V_i と
車両 V_j は接続した（仮想的通信路が確立した）とする。

$$R_{cij}(t) \geq 1 \quad and \quad R_{cji}(t) \geq 1$$

(3) データ送受信フェーズ

仮想的通信路が確立した車両に対して、データパケ
ットを相互に送受信する。車両 V_i と車両 V_j のそれぞれの
ルーターを R_{bi} および R_{bj} とし、それぞれのルーターが
各々 $P_{p1} \sim P_{pn}$ および $P_{q1} \sim P_{qm}$ までパケットを所持している
とし、下記のように表現する。

$$R_{bi}(t) = (P_{p1}, P_{p2}, P_{p3}, \dots, P_{pn})$$

$$R_{bj}(t) = (P_{q1}, P_{q2}, P_{q3}, \dots, P_{qm})$$

今、通信速度がデータパケット P_{pi} および P_{qi} とほぼ同
様であったとすると、送信したパケットは相手側車両の
ルーターの最後に配信されることとし、

$$if \quad | V_i(t+2)[x_i, y_i, h_i] - V_j(t+2)[x_j, y_j, h_j] | \leq L_m$$

$$with \text{ probability } 1 - \varepsilon_m$$

$$and \quad R_{cij}(t+2) \geq 1 \quad and \quad R_{cji}(t+2) \geq 1$$

$$R_{bi}(t) = (P_{p1}, P_{p2}, P_{p3}, \dots, P_{pn}, P_{q1})$$

$$R_{bj}(t) = (P_{q1}, P_{q2}, P_{q3}, \dots, P_{qm}, P_{p1})$$

と設定する。また、受信したデータパケット情報（受信
応答確認パケット）を送信側に返信する。

ここで、ルーターとなる各車両には、受信できるパ
ケットの最大容量であるバッファ（ C_i ）が設定されて
おり、バッファ以上のパケットを受信した場合は、バッ
ファに入らないパケット分を棄却し、棄却パケット情報
を送信側に返信する。

$$\text{if } C_i \leq (\sum P_{pn}(t) + \sum P_{qm}(t)), \quad C_i = (\sum P_{pn}(t))$$

さらに、各データパケットには、有効期限であるTTL (Time To Live) を設定し、受信したパケットのTTLを1つ減らすこととする。

(4) データ更新フェーズ

V_i がデータ送受信フェーズにてデータパケット P_{pi} を送信し、受信応答確認パケットを受信した場合は、パケット P_{pi} を V_i のルーターの最後に移動することとし、下記のように表現する。

$$R_{bi}(t) = (P_{p2}, P_{p3}, \dots, P_{pn}, P_{q1}, P_{p1})$$

$$R_{bj}(t) = (P_{q2}, P_{q3}, \dots, P_{qm}, P_{p1}, P_{q1})$$

ここで、データ送受信フェーズにて V_i が受信応答確認パケットまたは棄却パケット情報を受信した場合は、該当データパケットである P_{pi} のTTLを1つ減少させる。また、この時点で V_i が所持しているパケット総量のうちバッファのある一定割合以上を使用していた場合は、TTLの最も少ないパケットを破棄する。

(5) データ接続フェーズ

仮想的通信路が確立した相手から、ある一定時間応答がない（仮想的通信路を確立している車両が物理的な通信可能範囲から離脱して通信が不可能になった、あるいはエラーが一定時間続いた）場合は、接続がタイムアウトされたとみなし、仮想的通信路を切断する。

本研究では以上の各フェーズを情報伝播モデルとし、交通シミュレータ Paramics 上へ API (Application Programmable Interface) を活用して実装することで、車車間通信が可能な独自のシミュレーションモデルを構築した。

4. シミュレーション実行結果

本稿では、①DSRC による車車間通信を想定し、通信可能範囲を 30m とした場合、②無線 LAN による車車間通信を想定し、通信可能範囲を 100m とした場合とで、それぞれシミュレーションを実行した結果を示す。なお、OD 交通量や車両発生タイミング、道路ネットワークデータなどは、どちらのケースでも同一とした。

図-1に、道路ネットワーク上に十分な車両が存在している時の、情報通信ネットワークの形成図を示す。これより、DSRC を想定とした場合では、情報通信ネットワークが所々途絶している。これに対し、無線 LAN を想定とした場合では、ほぼ道路ネットワークと同じだけの情報通信ネットワークが形成されていることが分かる。

図-2は、時間経過に伴い、あるパケットがどのように伝播するか着目したものを示した。今回のシミュレーション条件では、DSRC を想定とした場合で、途絶した

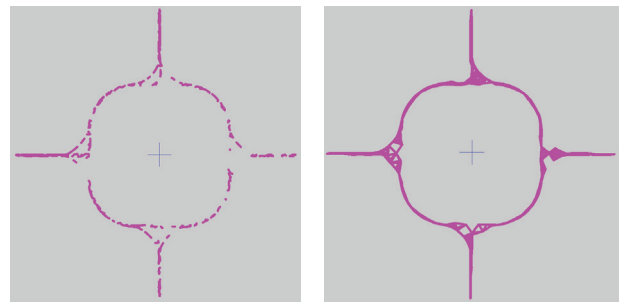
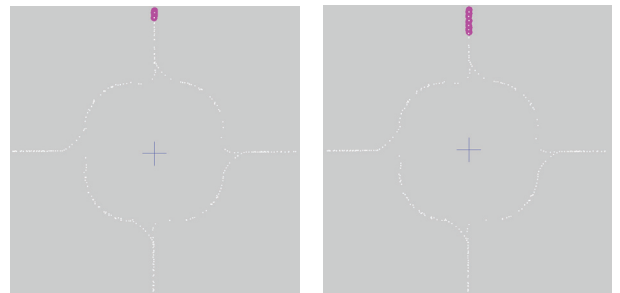
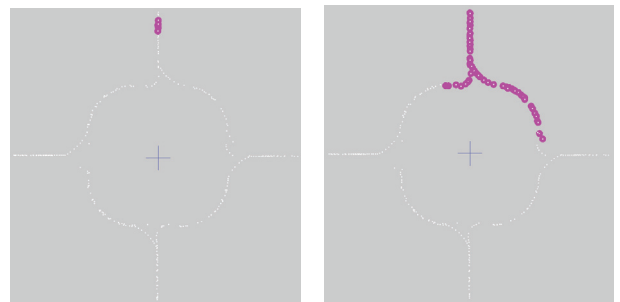


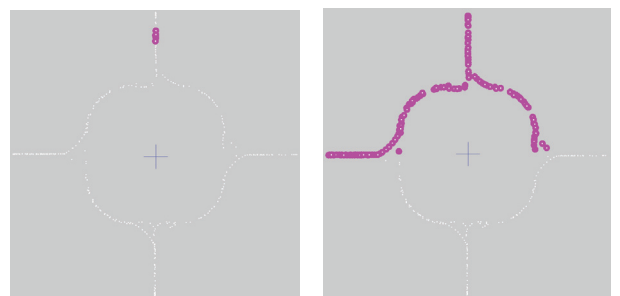
図-1 情報通信ネットワーク形成(左が DSRC 想定時)



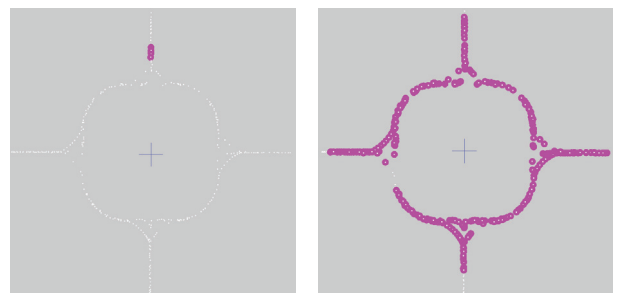
あるパケットがある車両に送信されてから、1秒後



5秒後



10秒後



15秒後

図-2 パケットの伝播の様子(左が DSRC : 通信可能距離 30m. 右が無線 LAN : 通信可能距離 100m)

箇所が散在し、空間的に情報が広がりにくい様子が見られ、ネットワーク上のある1台の車両に情報が与えられてから、およそ15秒経過してもネットワーク全体ではほとんど情報は広がっていない。これに対し、無線LANを想定した場合は、およそ15秒経過するとほぼネットワーク全体に情報が広がっている様子が分かる。

以上の結果から、個々のエージェントの共通なルールは全く同一であり、かつ交通状況も同様で、通信可能範囲のみ変化させた場合に注目しても、全体の挙動が大きく変化することを示した。

さらに図-3および図-4に、車車間通信をDSRCとして想定した場合と無線LANとして想定した場合とで、それぞれ道路上の各リンクにおける10秒あたり平均密度と、パケットの空間的平均移動速度の関係を示した。

DSRCを想定した場合は、無線LANを想定した場合と比較してパケットの平均移動速度のばらつきが少なく、平均密度が0.01未満である場合など、車両がリンクにあまり存在しない場合は特にばらつきは少なく、パケットの平均移動速度は遅い傾向にある。各リンクの平均密度が0.01~0.03あたりまではパケットの平均移動速度にばらつきが多く見られ、場合によっては車両の移動速度よりも遥かに速くパケットが移動している。しかし平均密度がさらに増加するに従い、パケットはネットワーク全体としてはあまり移動しなくなる結果になった。

無線LANを想定した場合は、各リンクの平均密度が0.03未満ではばらつきが見られるが、全体的にDSRCよりもパケットの平均移動速度は速い傾向にある。また、平均密度がさらに増加するとパケットがほとんど移動しなくなることはDSRCと同様の傾向であった。

ここで道路交通上での密度と速度を考えると、両者は反比例の関係にあることが知られている。しかし、本稿でのリンク密度とパケットの移動速度の関係は単純な反比例にはならず、密度が極端に低いと速度も遅く、密度が増加するにつれてばらつきがあったものの速度も上昇し、そしてさらに密度が増加すると速度が再び遅くなるという結果になった。

このような関係は、蟻のフェロモンモデル¹⁾などで見られる現象と類似しており、図-5に蟻の密度と移動速度の関係の概念図を示す。この関係は車車間通信でも同様のことが言える。すなわち、交通密度が極端に低い場合は通信する相手の車両があまり存在せず、情報は車両の移動速度に依存するためパケットの速度は遅い。ある程度密度が高くなってくると通信する相手の車両が適度に存在するようになり、情報は車両を次々に渡りながら高速で移動する。さらに密度が高くなると、今度はブロードキャストストームやパケット衝突が発生するようになり、情報の移動速度はかえって遅くなってしまおうと考えられる。

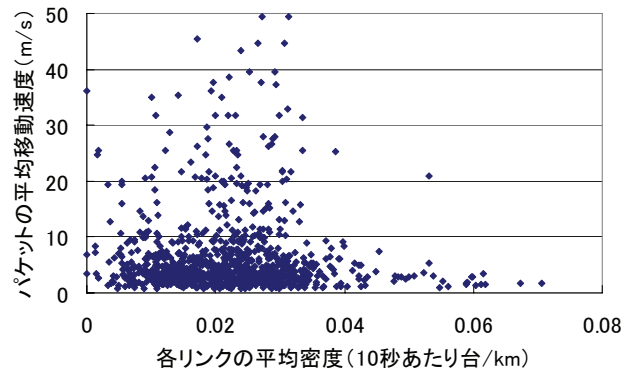


図-3 平均密度とパケットの移動速度の関係 (通信可能範囲が30mの場合)

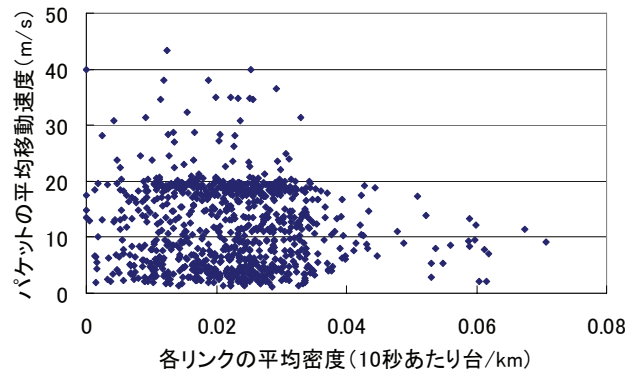


図-4 平均密度とパケットの移動速度の関係 (通信可能範囲が100mの場合)

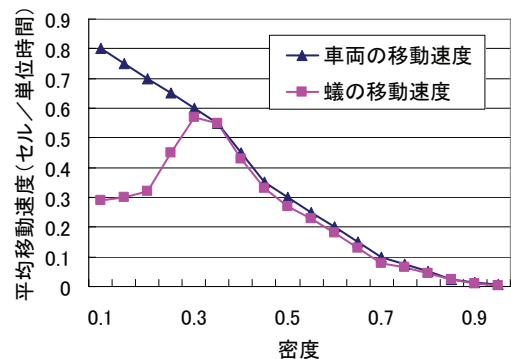


図-5 車両と蟻の密度と速度の関係 (概念図)

5. おわりに

今後は、マルチエージェントの特性をさらに生かし、エージェントの学習性や相互性をモデルに反映させることが課題である。具体的には交通密度が高い場合は同時接続数を自ら制限するなどのルール変更を考慮した場合に、全体がどう変化するかなどを分析することが課題である。

参考文献

- 1) 西成活裕：確率セルオートマトンモデルによる蟻の交通流解析、物性研究、Vol. 82、No. 2、p p. 257-263、2004年