

VANETのためのシミュレーション・システムの 提案とその評価

田中 亮達[†] 池田 誠[†] デマルコ ジュゼッペ^{††} バロリ レオナルド[‡]

[†] 福岡工業大学大学院工学研究科 ^{††} 豊田工業大学工学部

[‡] 福岡工業大学情報工学部情報通信工学科

あらまし Vehicle Ad-hoc Network (VANET) は Mobile Ad-hoc Network (MANET) を車々間通信に応用したものである。VANET 及び MANET では、通信ノード間の位置関係や電波伝搬環境によって物理トポロジが変化し、そのため経路制御プロトコルが重要になる。MANET では、Random Waypoint (RW) モデルを用いたシミュレーションで経路制御プロトコルの評価が行われることが多い。VANET の通信ノードの移動パターンは交通網に沿ったものであり、周囲のノードの動きに制約を受ける。本稿では、VANET のための Cellular Automata に基づいた新しいシミュレーション・システム (Cellular Automaton based Vehicular Network simulator: CAVENET) を提案する。VANET の移動パターンを一次元セル・オートマトンとして CAVENET に反映させ、経路制御プロトコルを実装し、シミュレーションによって CAVENET の動作を確認した。Goodput とパケット配送率を尺度として、経路制御プロトコルの評価を行った結果、AODV と OLSR より DYMO プロトコルの方が良いパフォーマンスを示すことが分かった。

A Simulation System for VANETs and Its Performance Evaluation

Ryotatsu TANAKA[†], Makoto IKEDA[†], Giuseppe DE MARCO^{††}, and Leonard BAROLLI[‡]

[†] Graduate School of Engineering, Fukuoka Institute of Technology (FIT)

E-mail: {mgm07005, bd07001}@bene.fit.ac.jp

^{††} Department of Engineering, Toyota Technological Institute

E-mail: demarco@toyota-ti.ac.jp

[‡] Department of Information and Communication Engineering, FIT

E-mail: barolli@fit.ac.jp

Abstract Vehicle Ad-hoc Network (VANET) is a kind of Mobile Ad-hoc Network (MANET) that establishes wireless connection between cars. In VANETs and MANETs, the topology of the network changes very often, therefore implementation of efficient routing protocols is very important problem. In MANETs, the Random Waypoint (RW) model is used as a simulation model for generating node mobility pattern. On the other hand, in VANETs, the mobility patterns of nodes is restricted along the roads, and is affected by the movement of neighbor nodes. In this paper, we propose a new simulation system for VANET called CAVENET (Cellular Automaton based Vehicular Network simulator). In CAVENET, the mobility patterns of nodes are generated by an 1-dimensional cellular automata. We implemented some routing protocols in CAVENET and investigated the CAVENET performance. The simulation results have shown that DYMO protocol has better performance than AODV and OLSR protocols.

1 はじめに

近年、旅客輸送の半数が自動車によるものである¹⁾。その自動車には Global Positioning System (GPS) を利用したカー・ナビゲーション・システムや Vehicle Information and Communication System (VICS) といった情報サービスがある。これらのサービスでは、自動車は人工衛星や沿道のビーコンから情報を受信することで運転者に道路状況を提供している。一方、車両の位置、速度、及び車両制御情報をその周囲の車両と送受信し合うことによって、交

通事故防止や交通渋滞抑制を実現することが期待される。平成 12 年には、5 台の自動車による車群協調走行が実現されている²⁾。また、車両に取り付けられたセンサを用いて、交通トラフィックや環境の情報を収集するプローブ情報システム³⁾がある。Vehicle Ad-hoc Network (VANET) はこれらのアプリケーションを実現するための無線ネットワークである。

Mobile Ad-hoc Network (MANET) の経路制御プロトコルを VANET に応用するため、Ad-hoc

On-demand Distance Vector (AODV)⁴⁾ と Optimized Link State Routing (OLSR)⁵⁾, Dynamic MANET On-demand (DYMO)⁶⁾ のそれぞれのプロトコルを Cellular Automaton based Vehicular Network simulator (CAVENET) に実装した。シミュレーション結果から、Goodput (単位時間当たり実質的に受信した情報量) の時間推移とパケット配送率 (Packet Delivery Ratio: PDR) を経路制御プロトコルの評価尺度としたとき、概ね DYMO が良好なパフォーマンスを示した。

以下、2章では、VANET と MANET の相違を考慮して、両研究領域の関連研究について述べる。シミュレーションで用いる経路制御プロトコルについて3章で述べ、4章では VANET のためのシミュレーション・システムとして CAVENET について述べる。5章では、シミュレーションのシナリオとその結果を述べて、考察する。最後に6章で総括する。

2 関連研究

MANET は通信ノードが移動する自律分散型無線ネットワークであり、フラットなネットワークを P2P の通信ノードで構成する点で、基地局のある携帯電話等の移動体通信やポーリングに基づく集中制御の無線ネットワークと異なる。通信ノードの直接的な通信距離には限界があるが、直接的な通信ができなくても他ノードを経由することができるのであれば、それをルータとすることで通信する。MANET は、このようにノード間の無線リンクを用いてマルチホップで通信することに特徴がある。

MANET では、マルチホップを実現するノードの移動や消失、電波伝搬環境の影響によってネットワークのトポロジが変化する。変化するトポロジに着目して、無線ネットワークを Geometric Random Graph (GRG) として捉えて、その数理や対処するためのアルゴリズム研究が広範に行われている⁷⁾。この経路制御プロトコルをトポロジ利用型とする一方で位置情報を利用した経路制御プロトコルもある。文献⁸⁾によると位置情報利用型では、GPS 等で位置情報を各ノードが認識し、通信する際の宛先ノードの位置をロケーションサービスで知ることによってデータパケットを送信する。トポロジ利用型では経路情報を適宜更新するための Routing Overhead (RO) によって、通信容量が逼迫し、PDR が低下するため、スケーラビリティに限界が生じることが考えられる。既に GPS 技術が民生に普及しているので位置情報利用型が導入し易いと考えられるが、これを補完することや GPS を利用できない環境を想定

したときにトポロジ利用型は必要である。

トポロジ利用型の経路制御プロトコルは複数提案されており、プロトコルによってネットワークの性能が異なる。その際の MANET の移動モデルとして、文献⁹⁾¹⁰⁾ では Random Waypoint (RW) モデルが用いられている。RW モデルでは、ノードが静止した状態からランダムな方向へランダムな速度で平面上を等速に進むことを繰り返す。そのモビリティメトリックとして、ノードが静止する時間のみを考慮しているだけであり、速度及び位置は反映されない。RW モデルでは、シミュレーションの時間経過に従って移動速度の集合平均が低下し、また、ノードの分布に偏りが生じるため、文献¹¹⁾ では RW モデルの改良が提案されている。そして、文献¹²⁾ では、速度、移動方向、位置、通信距離及び静止時間を利用したモビリティメトリックによって、経路制御プロトコルの特性を明確にできるとしている。

一方、MANET とは異なり、VANET ではノードの移動パターンは道路に沿ったものであり、周囲のノードの動きに制約を受ける。文献¹³⁾¹⁴⁾ では、ノードの密度対交通流量やノードの位置の時間推移を表した時空間図の渋滞箇所の挙動から、本稿で提案するシミュレーション・システムと共に交通工学的に正当性がある。しかし、文献¹⁴⁾ のモデルを用いて文献¹⁵⁾ では AODV と OLSR を比較対照しているが、ノードの移動速度を一様にしている。また、文献¹³⁾ ではシミュレーション・システムの移動パターンの生成方法とその評価を交通工学的な観点から述べているが、具体的な経路制御プロトコルの評価を行っておらず、その有効性は確認されていない。

文献⁹⁾ では、リアクティブ型が OLSR を除くプロアクティブ型に対して、文献¹⁰⁾ では OLSR がリアクティブ型に対して PDR や RO を評価尺度としたとき比較的良好な結果である。そのため、文献¹⁵⁾ でも、AODV と OLSR が VANET シミュレーションで用いられる。本稿では、AODV、OLSR、及び DYMO を CAVENET に実装する。

3 経路制御プロトコル

通信ノードが移動することによって、ネットワークのトポロジが変化する可能性が高まる。トポロジ利用型には、物理トポロジの変化に定期的に対応する方式 (プロアクティブ型) と変化が生じた時点で対応する方式 (リアクティブ型) がある。プロアクティブ型の特徴としては、ネットワーク規模に応じた RO を満たせば、ネットワークのトラフィックの増加に対応できる。一方、リアクティブ型では、ト

ラフィックの増加に対して RO がある程度まで比例する。そのためトラフィック量に応じてプロトコルごとの RO の大小関係が逆転する¹⁵⁾。

VANET に特化したトポロジ利用型の経路制御プロトコルは考案されていない。そのため、プロアクティブ型の OLSR とリアクティブ型の AODV、更に DYMO を用いて、CAVENET において経路制御プロトコルを評価する。次節からシミュレーションで用いるプロトコルについて説明する。

3.1 OLSR

あるノードの全隣接ノードが、経路制御のための情報をフラッティングによってネットワーク全体に伝えらると、トラフィック量と無線帯域の使用が増えるのでネットワークの性能が低下する。そこで、あるノードがローカルブロードキャストを行う際、隣接ノードから MPR ノードを選び出して限定的にマルチキャストする。この MPR フラッティングによって、伝えられる情報はあるノードと MPR ノード間のリンク情報である。また、MPR フラッティングの送信元も MPR ノードである。あるノードとリンク状態が良いノードが MPR ノードとして、RFC に対応したヒューリスティックなアルゴリズムを用いて選ばれる。MPR ノードに限定された経路情報に基づく経路制御をすることで RO を削減する。

OLSR では、各ノードが定期的に送信する Hello メッセージによって、それぞれのローカルな経路を構築し、それぞれの MPR ノードによって、Topology Control (TC) メッセージを定期的に MPR フラッティングすることで各ノードにネットワーク全体の経路情報が伝えられる。

3.2 AODV

AODV には、経路探索と経路保全の 2 つのメカニズムがある。経路探索は、送信ノードが宛先ノードへのパケットを持ち、宛先ノードへの経路を保持していない場合に働く。経路保全は利用中の経路が利用できなくなった場合にそれを検出し、代替経路の探索を発動するメカニズムである。

経路探索は、まず各ノードがもつ経路表を参照し、宛先への経路がある場合は次ホップへパケットを送信する。経路がない場合には、データパケットを送信待ちバッファに置き、送信ノードは RREQ (Route Request) を生成し、ブロードキャストする。RREQ を受け取ったノードが宛先ノードであるか、宛先ノードへの経路を保持している場合、RREP (Route Reply) を生成し、送信ノードへユニキャストする。RREP は RREQ が運ばれた経路を逆に辿

り、送信ノードに至る。この過程で宛先ノードへの経路情報が各ノードの経路表に生成され、保持される。送信ノードが、RREP を受信した時点で経路が確立され、送信ノードは送信待ちバッファで待機していたデータパケットと後続のデータパケットの送信を開始する。RREQ 送信後、一定時間内に RREP が戻らないときは RREQ を繰り返すことができる。同じ宛先ノードへの RREQ を送る場合には、指数バックオフを行うことでネットワークの輻輳を減らす。

経路保全は、リンク切断の検出、RERR (Route Error) の生成、及びローカル経路修復がある。隣接ノードへのパケット送信失敗を MAC 層からの通知にもとづき、検出する。パケット送信後、ACK が受信されない場合と RTS 送信後 CTS が受信されない場合に、パケット送信失敗が検出され、一定の回数の再送を行ってもパケットを送信できなければリンク切断と判断する。このような MAC 層からの通知がなされない場合、有効経路に含まれる隣接ノードとのリンクの維持を確認するため、定期的に RREP を利用した Hello メッセージをローカルブロードキャストする。一定時間以上、Hello メッセージあるいはその他のパケット受信されない場合、その隣接ノードとのリンクが切断されたと判断する。RERR 生成は、リンク切断を検出したノードが、上流にある送信ノードまで経路を無効化させていき、最終的には送信ノードに再 RREQ をブロードキャストさせる。ローカル経路修復はリンク切断を検出したノードが上流の経路を保持したまま、宛先経路への代替経路を探索する。

3.3 DYMO

DYMO は AODV の後継プロトコルとして、Internet Draft となっている。AODV のように経路探索と経路保全のメカニズムがある。通信要求が発生し、宛先への経路がない場合には、一定周期の Hello メッセージをブロードキャストする。そのため、経路を再発見したときプロアクティブ型のように早期のパケット送信が可能となる。

4 提案シミュレーション・システム (CAVENET)

本稿では、VANET のシミュレーション・シナリオの移動パターン生成を MATLAB で実装し、ネットワーク・シミュレーションを ns-2 で実行する軽量なシミュレーション・システムを提案する。Cellular Automaton based Vehicular Network simulator

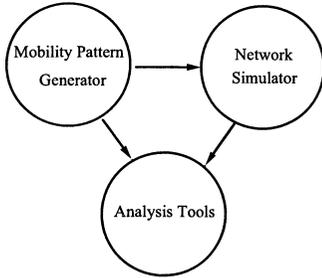


図 1 CAVENET の構成図

(CAVENET)¹³⁾ は、図 1 のように、移動生成部 (Mobility Generator) とネットワーク・シミュレータ部 (Network Simulator) で構成される。ネットワーク・シミュレータ部は、オープンソースである ns-2 を使う。移動生成部でノードの許容最大速度、ノード数、単路長、車線数、減速の発生率、及びシミュレーション実行時間を入力し、生成された移動パターンとシナリオをネットワーク・シミュレータ部で処理する。出力されたデータを解析部 (Analysis Tools) に掛ける。VANET において、通信ノードの移動パターンは道路に沿ったものであり、周囲のノードの動きに制約を受ける。そこで、ノード間の距離に基づいて、速度が変化する Proportional Differential (PD) モデルをもとにノードの移動パターンを一次元セル・オートマトンとして扱う。ノードの動きを決定論的な振る舞いと確率論的な振る舞いで表す。決定論的な振る舞いは、式 (1) から式 (3) によって表す。

$$v_{i,n+1} = \min(v_{i,n} + 1, v_{max}) \quad (1)$$

$$v_{i,n+1} = \min(v_{i,n}, L_{i+1,n} - L_{i,n} - 1) \quad (2)$$

$$L_{n+1} = L_n + v_{n+1} \quad (3)$$

$$v_{i,n+1} = \max(0, v_{i,n} - 1) \quad (4)$$

それぞれ、 i :各ノード ID、 n :シミュレーションの離散時間、 $v_{i,n}$ 、 $L_{i,n}$:ノード i の時間 n における速度と位置座標、及び v_n 、 L_n :時間 n における全ノードの速度と位置である。確率論的な振る舞いは、式 (4) で表わされる。発生率 p を定数とした定常ポアソン過程で、式 (4) の状態となる。シミュレーションの離散時間は 1 クロックを 1 秒として、1cell を 7.5m、最高速度を 135km/h とした。

5 シミュレーション結果

本稿では、シミュレーション時間の推移からみた Goodput と送信ノードの位置ごとの PDR を経路制

表 1 シミュレーションパラメータ

Network Simulator	ns-2
Routing Protocol	AODV, OLSR, DYMO
Simulation Time	100s
Simulation Area	3000m Circuit
Number of Nodes	30
Traffic Source/Destination	Deterministic
DATA TYPE	CBR
Packets Generation Rate	5packets/s
Packet Size	512 bytes
MAC Protocol	IEEE802.11 DCF
MAC Rate	2Mbps
RTS/CTS	None
Transmission Range	250m
Radio Propagation Models	Two-ray Ground
Hello _{aodv} Interval	1s
Hello _{olsr} Interval	1s
TC _{olsr} Interval	2s
Hello _{dymo} Interval	1s

御プロトコルの評価尺度とした。

5.1 シミュレーション・シナリオ

まずノードをランダムにサーキットに静止したまま配置する。ノード ID は # 0 から # 29 まであり、番号順に隣接する。その後、4 章の移動パターンの生成規則に従って、100 秒間ノードが動く。単路を想定しているため車線は一つであり、追い越しと割り込みは想定しない。

受信ノードは ID を # 0 とし、送信ノードは # 1 から # 8 とし、それぞれの送信ノード ID ごとにシナリオを作成する。全シナリオの移動パターンは等しくする。経路制御プロトコルによる通信性能の違いをシミュレーションによって明らかにするため、表 1 の通り、512bytes のデータパケットを Constant Bit Rate (CBR) とし、単位秒当たり 5 パケット、10 秒から 90 秒まで流す。

AODV は ns-2 に実装されたものを用いる。AODV のシナリオでは、MAC 層での経路保全を補完するための Hello メッセージを 1 秒間隔とする。OLSR は UM-OLSR¹ をネットワーク・シミュレーション部に実装し、Hello 間隔を 1 秒、TC メッセージ間隔を 2 秒とする。DYMO は DYMOUM² を実装し、経路探索のための Hello 間隔を 1 秒とする。

5.2 シミュレーション結果と考察

送信ノード (Sender ID) ごとのシミュレーション時間経過による Goodput の推移を図 2 から図 4 にかけて表す。各送信ノードは別々のシナリオであるため各ノードごとのパラレルな時間推移となる。

¹ <http://sourceforge.net/projects/um-olsr/>

² <http://sourceforge.net/projects/dymoum/>

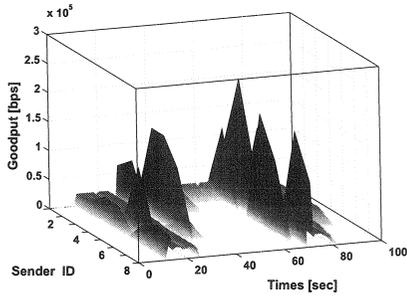


図 2 AODV シナリオの Goodput

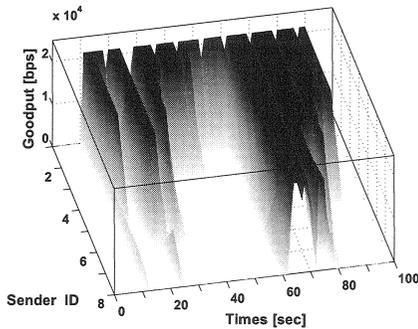


図 3 OLSR シナリオの Goodput

図 2 では、AODV の Goodput は送信された CBR パケットの 10 倍近くまで跳ね上がる。これは、指数バックオフによって溜め込まれたデータパケットが経路発見後に急速に送信されたためである。シナリオでは、送受信ノード一対で CBR のトラフィックをシミュレーションしたが、バックグラウンドとなる通信トラフィックを増やした場合、このような急激なパケットの送受信が増えることによりネットワークが不安定になることが予想される。また、AODV では経路発見の遅れによって 60 秒以降で数秒の遅延が発生している。図 2, 3, 4 を通してみると OLSR に比べてリアクティブ型プロトコルは、送信ノードが離れても通信できる機会 (10s から 20s 間など) をよく維持している。

図 5 では、どのシナリオも、AODV の PDR が他プロトコルよりも高く、DYMO の PDR は送信ノードが遠くなるにしたがって漸次減少している。また、送信ノードが # 1 のシナリオを除いて、OLSR の PDR が他プロトコルより 10% から 20% 低い。送受信間を離すことにより、OLSR はリアクティブ型よりも Goodput の減少が著しくなる。OLSR の # 6 と # 7 の間、及び AODV の # 4 と # 5 の間を除け

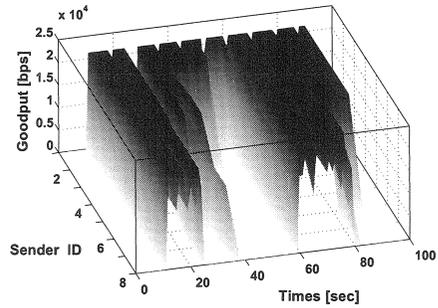


図 4 DYMO の Goodput

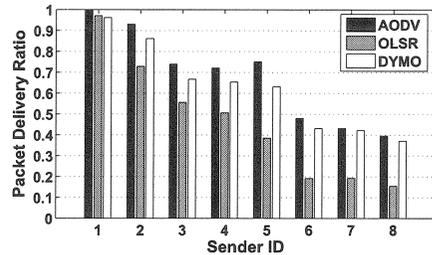


図 5 Packet Delivery Ratio

ば、両者についても送受信端末が離れるほど PDR が減少する。OLSR の # 6 と # 7 の間と AODV の # 4 と # 5 の間の PDR については、送信ノードを一つ遠くづらしたただけであるが、PDR が若干小さくなっている。これは、パケット送出や転送のタイミングが好条件であれば送受信間が離れても PDR が上がると考えられる。

Goodput の時間推移から、DYMO と AODV は、送信ノードが離れても OLSR より Goodput を維持しやすい。しかし、AODV では、経路探索のための指数バックオフによって、経路発見が遅れ、Goodput の分布が極端である。また、DYMO は AODV よりも経路発見が OLSR と同じように早かった。一方、PDR は、送受信間が隣接している場合を除き、送信ノードが離れても OLSR よりも DYMO と AODV が良好であった。この結果から、DYMO は AODV と OLSR よりも概ね良好なパフォーマンスを示すことが分かった。

6 むすび

CAVENET によって、MANET のための経路制御プロトコルを VANET を想定して評価することができた。AODV の時間経過による Goodput では、経路発見時に急激なデータパケットの受信が起こることが確認できた。DYMO と AODV は、Goodput

が現れる時間が送受信間距離が離れても維持しやすいという点で、OLSR よりも良好であった。PDR についても、送受信間が隣接している場合を除き、OLSR よりも良好であった。しかし、Goodput の時間推移から DYMO は AODV よりも経路発見が OLSR と同じように早かった。Goodput と PDR を評価尺度として、DYMO は AODV と OLSR よりも概ね良好なパフォーマンスを示すことが分かった。

今後の課題として、VANET に供する経路制御プロトコルを統計的に評価するために、モンテカルロ法によるシミュレーションを行いたい。Goodput と PDR だけでなく、通信トラフィック量やトポロジの変動に対する遅延、遅延分散、及び RO の評価尺度を利用し、プロトコルを多角的に評価したい。また、単路だけでなく複数の車線や反対車線、交差点などの道路網を考慮した移動パターンに拡張する。周囲に建物などの構造物があることによる電波伝搬の影響による評価もして行きたい。^{16) 17)}

参考文献

- 1) 国土交通省編, 国土交通白書 2008 平成 19 年度 年次報告 進行する地球温暖化とわたしたちのくらし, ぎょうせい, 2008.
- 2) 徳田清仁, デモ 2000 協調走行の車々間通信技術, 信学技報, ITS2000-46, pp.25-30, 2000.
- 3) 和田光示, プローブ情報システム (IPCar) プロジェクト (<特集> インターネットと自動車), IPSJ Magazine, Vol.43, No.4, pp.363-368, 2002.
- 4) C. Perkins and E. Belding-Royer and S. Das, Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, IETF RFC 3561 (Experimental), July 2003.
- 5) T. Clausen and P. Jacquet, Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), IETF RFC 3626, October 2003.
- 6) I. Chakeres and C. Perkins, Dynamic MANET On-demand (DYMO) Routing, Internet Draft (draft-ietf-manet-dymo-14), June 2008, Work in progress.
- 7) P. Santi, Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks, Wiley, 2005.
- 8) 間瀬憲一, 車々間通信とアドホックネットワーク, 信学論 (B), Vol.J89-B, No.6, pp.824-835, 2006.
- 9) J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y. Hu and J. Jetcheva, A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless AdHoc Network Routing Protocols, In Proc. ACM MobiCom '98, pp.85-97, 1998.
- 10) T. H. Clausen, P. Jacquet and L. Viennot, Comparative Study of Routing Protocols for Mobile Ad-hoc Networks, In Proc. 1st IFIP MedHocNet Conference, 2002.
- 11) J. Yoon, M. Liu and B. Noble, Random Waypoint Considered Harmful, In Proc. IEEE INFOCOM '03, pp.1312-1321, April 2003.
- 12) 津持純, 昌山一成, 上原秀幸, 横山光雄, アドホックルーティングプロトコルにおけるノードの移動情報を利用したモビリティメトリックの検討, 信学技報, Vol.103, No.202 (20030711), pp.79-84, 2003.
- 13) G. De Marco, M. Tadauchi and L. Barolli, CAVENET: Description and Analysis of a Toolbox for Vehicular Networks Simulation, In Proc. of IEEE ICPADS/PMAC-2WN '07, Vol.2, pp.1-6, 2007.
- 14) J. Haemi, M. Fiore, F. Filali and C. Bonnet, A Realistic Mobility Simulation for Vehicular Ad Hoc Networks, EURECOM Technical Report, 2007 Available at <http://www.eurecom.fr/util/publiupload.en.htm?id=1811>.
- 15) J. Haerri, F. Filali and C. Bonnet, Performance Comparison of AODV and OLSR in VANETs Urban Environments under Realistic Mobility Patterns, In Proc. IFIP Med-Hoc-Net '06, 2006.
- 16) 田中亮達, 阿武純平, デマルコ ジョゼッペ, バロリ レオナルド, 無線アドホック・ネットワークの Connectivity を解析するためのシミュレーション・システム, 情処学研報, Vol.2007, No. 16, pp.117-122, March 2007.
- 17) D. Dhoutaut, A. Régis and F. Spies, Impact of Radio Propagation Models in Vehicular Ad hoc Networks Simulations, In Proc. VANET '06, pp.40-49, September 2006.