

車車間通信を利用した信号機制御手法の提案

桐村昌行[†] 梅津高朗^{††} 山口弘純^{††} 東野輝夫^{††}
[†]三菱電機株式会社情報技術総合研究所
^{††}大阪大学大学院情報科学研究科

あらまし 本稿では、モバイルアドホック通信によって伝播させた車両情報を利用した効率的なリアルタイム信号機制御手法を提案する。提案手法では複数の車両のブロードキャストによって伝播した車両情報に応じてスプリットの配分やサイクル長の調整を行うことを特長としている。また、車両感知器未設置区間における車両状況把握や、前方だけでなく後方や直交方向の信号機に車両情報を伝播することにより交通状況に合った信号制御を実現している。また、従来の信号制御手法と比較し、本手法の有効性を検証する。

A Design of Traffic Signal Control Method Based on Inter-Vehicle Ad-hoc Communication.

MASAYUKI KIRIMURA[†] TAKAAKI UMEDU^{††}
HIROZUMI YAMAGUCHI^{††} TERUO HIGASHINO^{††}
Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation
Graduate School of Information Science & Technology, Osaka University

In this paper, we propose an efficient real-time traffic signal control algorithm using inter-vehicle ad-hoc communication. In our method, each vehicle broadcasts their vehicle information, while the signals calculate the split and cycle time needed for the signal control by using the broadcasted vehicle information which is transmitted by some vehicles. By using our method, we can detect the traffic situation of the area where there is no vehicle detector. Also our method realizes effectual traffic signal control by transmitting the vehicle information forward and backward. In addition, we verify the usefulness of our method compared with conventional technology.

1. はじめに

現在、全国交通渋滞による経済損失は12兆円以上ともいわれており¹⁾、一般道路での渋滞の一因として交差点での信号待ちが挙げられている。その一方で、渋滞時におけるアイドリングによるCO₂排出問題も指摘されている。

これらの交差点における渋滞問題の解決策としてさまざまな信号機制御方式が運用されている。代表的な信号機制御方式として、プログラム選択制御方式やプログラム生成制御方式などの中央感応制御方式や、プロファイル信号制御方式などがあり、総遅れ時間の短縮だけでなく交通事故の削減にも大きく貢献している²⁾³⁾⁴⁾。ただし、これらの信号制御方式は超音波車両感知器や光学式車両感知器などの路側固定センサーによる交通状況把握を行っており、感知器未設置区間の交通状況の把握が困難である。設置区間を短くすることで交通状況の把握を密にすることも考えられるが、固定センサーを大量に設置するには莫大なコストが必要となり、現実的ではない。

そのため、あらゆる場所や状況に適した信号制御を行うことが困難である。

一方、車車間通信を利用したさまざまなアプリケーションが研究開発されているが、すべての車両に対応車載機器を搭載することを前提としているサービスが多く、サービス黎明期において車載機器購入者がそのメリットを享受できない状況となり、販売数の鈍化につながる可能性が高い。そのため、車載機器購入者が即座にそのサービスのメリットを享受でき、かつ、非購入者にもある程度のメリットが得られるサービスモデルが望ましい。

そこで本稿では、すべての車両が利用する信号機に注目し、車車間通信を利用した信号機制御手法の提案を行う。本手法ではモバイルアドホック通信により自車の車両情報を周辺車両にブロードキャストし、複数の車両による情報伝播により信号機に提供する。信号機はある一定期間、複数の車両から受信した車両情報を集計することにより自信号のサイクル長およびスプリットを決定する。本手法では車両状況に即したリアルタイムな信号制御を行うことができるだけでなく、

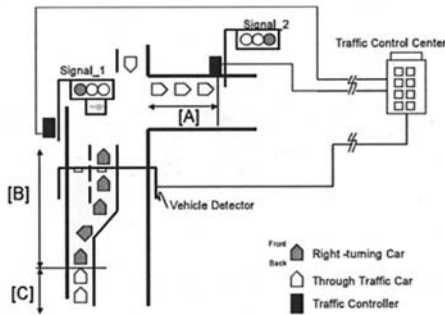


図 1 右折渋滞と交通管制の概要

路側車両感知器の設置場所に依存しないため、感知器未設置区間における交通状況の把握や、スキー場周辺や祭りなどの突発的な渋滞に対処した効率のよい信号制御を行うことが期待できる。また、対応車載機器購入者は交差点の交通円滑化に貢献し、そのメリットを最大限享受することが可能であり、非購入者にとっても少なからず通行の円滑化を享受することが期待できる。また、本手法のシミュレーション評価を行うための車載機器および信号制御器の設計考察を行った。

2. 従来の信号機制御手法と課題

現在、交通渋滞の解消のため、さまざまな信号機制御手法を利用した交通信号機が稼働している。プログラム選択方式は交差点に接続された車両感知器の情報からあらかじめ登録されたスプリットのパターンを選択する方式である。また、プログラム生成方式は路上に設置された車両感知器の情報から信号機のスプリットを生成する方式である。これらの手法では、感知器を通過した台数のパターンに応じて最適なスプリットを提供している³⁾。また、最近では新たな信号制御方式として、プロファイル信号制御方式の導入が進められている。この方式は信号機に付随したセンサーによって通過台数をカウントし、隣接する LAN 接続された信号機同士でカウント情報を共有することで広域交通流の交通制御を行っており、名古屋長久手線での実証実験において 8-16%の遅れ時間改善結果が得られている³⁾。ただし、これらの信号機制御方式は車両感知器を通過する車両の台数に依存した信号制御方式であり、それらの車両感知器間の交通状況の詳細を把握することができない。例えば、右折車による後続渋滞例を図 1 に示す。まず、A 区間において対向車が多い場合や右折先の Signal_2 で渋滞している場合、B 区画のように右折レーンに渋滞が発生してしまう。

車種ID	車両ナンバー
時刻	送信時刻YYYY/MM/DDhh/mm/ss
ワinker情報	Left / Right / None
速度情報	0km~100km/h
位置情報	精度従属情報 世界測地系 WGS-84
進行ベクトル	進行方向情報 16方位系
ホップ数	地車情報の場合の転送回数

表 1 車両情報の例

信号機ID	信号機のID
時刻	送信時刻 YYYY/MM/DDhh/mm/ss
位置情報	精度従属情報 世界測地系 WGS-84
対象進路ベクトル	対象進路の方向番号
サイクル長	信号が一定するまでの時間
スプリット	各表示のサイクル長に冠する割合
信号表示	交差点における通行パターン

表 2 信号機情報の例

次に、右折レーンに収まらない後尾の車両は主車線を塞ぐ形になり、C 区画において渋滞をさらに発生させる。このとき、C 区画では直進車も渋滞に巻き込まれることとなるため、Signal_1 が青信号になっていても直進できない状況に陥る。プログラム生成方式などでは、図 1 のように右折レーンの交通状況を車両感知器で把握し、その情報を交通管制センターに送信することで、関係する信号機のサイクル長やスプリットを変更する。ただし、感知器を通過した車両の台数等は把握できるものの、それ以南の B 区画後半および C 区画の渋滞の状況が把握できないという盲点がある。その結果、C 区画以降の渋滞を増長させる可能性がある。

3. 提案する信号機制御手法

本稿では、車車間通信を利用した信号機制御手法の提案を行う。本手法は、右左折ワinkerや走行速度および進行方向など車両に関する車両情報や、信号機のサイクル長やスプリットなどの信号機情報をモバイルアドホック通信によるブロードキャストを利用して、車両情報受信装置を備えた対象信号制御器に対して伝播・集計することで信号機のスプリットやサイクル長を調整する手法である。

3.1 車両情報

車両情報とは速度や右左折、自車位置および方向ベクトルなどの自車の状態情報である。これらの情報は GPS や車速パルスなどから得られる。なお、自車位置と方向ベクトルは対象信号機の特定と進行逆方向への車両情報伝播を抑制するために利用する。また、車両情報を転送する際のホップ数を記録する。本手法ではホップ数が多いほど車両密度が多いと推測し、渋滞度の指標とする。なお、トラックやバスなど大型車両や乗用車などの小型車両の種別などによる初速度の違いおよび車両長の違いを考慮することにより、より細かい信号制御を行うことも期待できる。

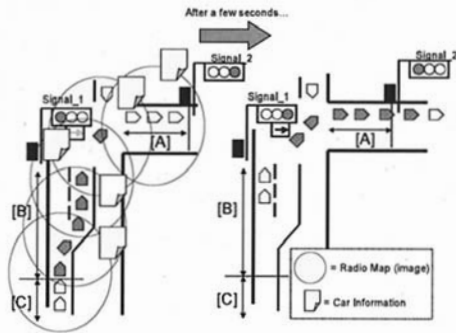


図 2 右折渋滞の解消例 (前方伝播方式)

3.2 信号機情報

信号機情報とは信号機の制御を行うための必要最低限の情報で、スプリットやサイクル長などを含む。各信号機はこの信号機情報に従って信号機制御を行うものとする。信号機情報は各信号機に設置された信号制御器において車両情報を解析することによってそのパラメータ値を更新するものとする。また、信号機情報を自信号機だけでなく他信号機にも送信することで局所的な系統制御を行うことが可能である。ただし、厳密な信号制御を行うためには、隣接する交差点信号機同士の時間差であるオフセットを考慮する必要がある。

3.3 車両情報伝播アドホック通信プロトコル

車両情報および信号機情報のブロードキャストには我々研究グループが開発したブロードキャストプロトコル CRCP(Collision Ratio Control Protocol)を利用する。CRCPは、自車がある一定期間受信したパケット数と検出したパケット衝突数の比率から自車周辺のパケット衝突率および帯域利用率の推定をおこなう。そして、その推定値を元にデータ受信量が最大になるようパケット送信間隔を調整する⁹⁾。

3.4 車両情報伝播方式

車両情報あるいは信号機情報を伝播するための4つの伝播方式を提案し、信号機制御との関係について説明する。

3.4.1 前方伝播方式

前方伝播方式とは、車両の進行方向に位置する信号機を制御するための手法である(図2)。例えば図2の場合、図1において渋滞が発生しているBおよびC区画の各車両は、ある速度閾値まで速度低下した際に右ウインカー情報および速度情報のブロードキャストを行う。このとき、他車から受信した車両情報についてはその車両と同一方向に向かっている場合のみ、その車両情報をブロードキャストし前方に伝播させる。

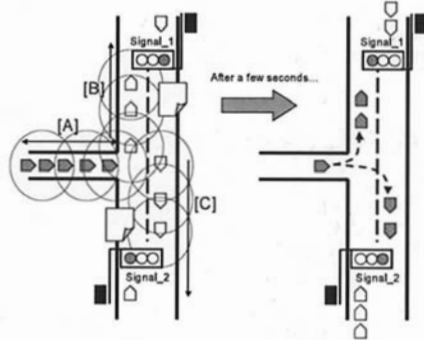


図 3 直交伝播方式

これらの車両情報は最終的に Signal_1 の信号制御器に達し、渋滞を起こしている右折車両の台数を把握することが可能である。そこで、この渋滞数に応じて補助信号のスプリットを調整することで右折レーンの渋滞を優先的に解消することが可能である。また、Signal_2 にこれらの車両情報を転送し Signal_2 を青信号のスプリットを拡張することで B、C 区画の右折渋滞を解消することが可能である。これにより、図1で問題であった車両感知器間での交通状況が不明な区域について各車両の車両情報を収集することによってその交通状況を把握することが期待できる。

3.4.2 直交伝播方式

直交伝播方式とは、車両の走行方向と直交する車線に位置する信号機を制御するための手法である(図3)。例えば図3のA車線のように信号無しの交差点において渋滞が長時間発生しており、主道路となる直交車線B、C車線において断続的に車両が走行しているものと仮定する。本方式ではA車線の渋滞を解消するため、A車線の各車両は主道路となる直交車線B、C車線を走行する車両に対して自車の車両情報をブロードキャストする。これらの車両情報は Signal_1 および Signal_2 に伝播する。各信号機は車両情報からA車線に渋滞が発生していることを検知し、各信号を赤信号にすることでB、C車線を走行する車両の台数を一時的に減らすことが可能である。これにより、A車線の車両の主車線への侵入を容易にし、A車線の渋滞を解消することが期待できる。ただし、前方伝播方式と異なり、対象道路(A車線)と信号機(Signal_1, Signal_2)との距離に応じてオフセットを厳密に算出しなければ、車線BおよびCに新たに渋滞が発生させる恐れがある。

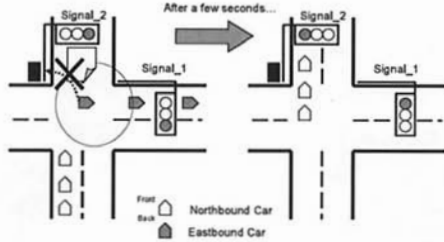


図 4 後方伝播方式

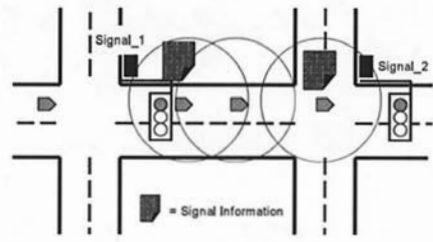


図 5 隣接交差点間伝播方式

3.4.3 後方伝播方式

後方伝播方式とは、車両の走行方向と逆方向に位置する信号機あるいは通過した信号機を制御するための手法である(図4)。例えば、簡易半感応方式のように従道路の車両を感知したとき、従道路に通行権を与えるような方式の場合、従道路の車両が通過した後に冗長な青時間が発生することが多い。そのため、主道路の車両の交通を妨げる一因ともなりうる。

そこで本手法は、車群最後尾の車両が信号機を通過後、通過信号機を赤信号にすることで冗長な有効青時間を縮小することを目的とする。図4では、東向き車両からの車両情報のある一定期間受信しないことで、その方向の通行が途切れたと判断する。このとき、東向き車線の信号を即座に赤信号にし、直交する車線の信号を青信号にすることで冗長な青時間を短縮し、南北方向の交通を円滑化することが可能である。

なお、最後尾の車両が交差点を通過する時刻があらかじめ算出可能であれば、交差点を通過直後に黄色信号にすることで冗長な青時間を短縮することが可能である。例えば、各車両が前方伝播方式と同様に進行方向が同一である車両情報のみを伝播対象とすると仮定した場合、ある一定期間同一車線から受信した複数の車両情報のうちホップ数が一番大きい車両情報が最後尾の車両と仮定し、その送信時の位置情報や車両速度情報によりその車両の交差点進入時刻の目安を算出することが可能である。ただし、歩行者信号が付随する交差点などでは歩行者の安全のため、車両信号と歩行者信号とのオフセットを考慮する必要がある。

3.4.4 隣接交差点間伝播方式

隣接交差点間伝播方式とは、隣接する交差点間の信号機同士で信号機の制御情報をその信号機間に存在する車両の車車間通信により送受信を行う系統制御手法である(図5)。例えばSignal_1のスプリットおよびサイクル長とその絶対時刻を含む信号機情報を東向きに走行する複数の車両を利用して情報伝播する。

基本的には前方伝播方式と同様に同一方向のみ信号機情報を伝播する。Signal_2は情報伝播によって受信したSignal_1の信号機情報を参照することが可能である。そしてそのスプリット情報から自信号機のスプリットおよびサイクル長を調整することで、この2信号機間における系統制御を実現することが可能である。また、信号機間を走行する車両の車両情報を受信することで、それぞれの速度や位置情報などから信号機間のオフセットを計算することでより最適なスプリットを算出することが期待できる。また、公共車両優先システム(PTPS: Public Transportation Priority Systems)²⁾のようにある特定の車両の通行を円滑にするサービスへの応用が期待できる。

4. 提案手法評価のための実装検討

3章の提案手法をシミュレーション評価するための車載機器および信号制御器の設計を行う。なお、本稿では、前方伝播方式と後方伝播方式の設計例を示す。

4.1 車載機器の設計

各車両に搭載する車載機器の動作は図6のフローチャートに従うものとする。基本的には、車両が低速状態に陥った場合に車両情報の送信動作を行うこととする。ここでは低速状態を一般的な渋滞速度の20km/h以下と定義する。まず、一定期間内において後方の他車から車両情報を受信していないかを確認する(K2, K3)。これは、同一の車両情報の配信による輻輳を防ぐために行う。なお、後方かどうかについては受信した車両情報の進行方向ベクトルおよび位置情報から推測を行うものとする。ここで受信した情報が一定期間内に既に送信したものであれば自車の車両情報を送信し(K4, K5)、そうでなければ他車の車両情報を送信することとする(K6, K7)。ただし、他車の車両情報を送信する場合は、車両情報のホップ数項目を1インクリメントすることとする。なお、送信周期については車両密度に依存することとし、CRCPにおける最適な送信周期を調整するものとする⁹⁾。

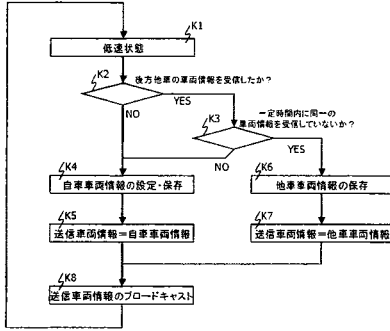


図 6 車載機器の動作フローチャート

4.2 信号制御器の設計

次に各信号機の信号制御器の動作は図 7 のフローチャートに従うものとする。なお、信号制御器は各交差点に 1 台ずつ配置し、交差点に進入する車両からブロードキャストされる車両情報を受信する。

まず、信号制御器は車両情報受信待機状態にあるものとする(L2)。ここでは 3 つのパターンとして、ある一定期間 (サイクル長) に、①交差点に車両が進入していない状態で前方伝播方式により車両情報を受信した場合、その進行方向を青信号にする方式 (L3, L4, L5)、②複数車両情報を受信している状態において、ある方向 (車線) の車両情報を受信しなくなった時点でその方向 (車線) の車両情報を赤信号にする後方伝播方式 (L6, L7)、③複数の車両情報からスプリット長とサイクル長を調整する方式 (L8, L9)を採用することとする。以下では、③でのスプリット長制御とサイクル長制御について詳細を述べる。

4.3 スプリット長制御

スプリット長制御については全国で多くの信号に採用されているプログラム生成制御(MODERATO : Management by Origin-DEstimation Related Adaptation for Traffic Optimization)と同様に、現示毎の流入量 (負荷率) に応じてスプリットの配分を行う負荷率比配分方式を採用する³⁴⁾。提案手法では、同一交差点に配置した各信号機のサイクル長はクリアランス時間とすべての方向の有効青時間すべて等しいものとし、各直交方向 (例えば東西方向と南北方向) から受信した車両情報のホップ数の総和の比率によってスプリット長を変更する。例えば、東西方向のホップ数総和が 100、南北方向のホップ数総和が 200 であれば、南北信号と東西方向の有効青時間の比率を 1.2 とする。ここでホップ数を利用するのは車両密度が高くなるにつれてホップ数が増大することに注目している⁹⁾。

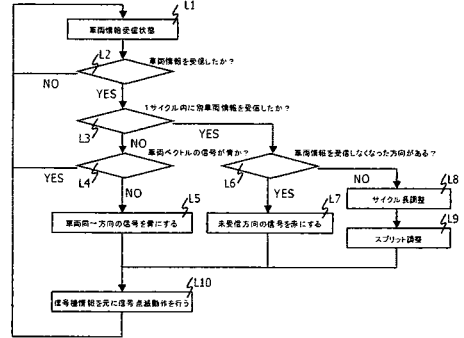


図 7 信号制御器の動作フローチャート

$$C_{now} = \sum_{K=DirNum} U_k + L \quad (1)$$

$$U_n = C_{now} \times \left(\frac{H_{now}(n)}{\sum_{K=DirNum} H_{now}(k)} \right) \quad (2)$$

C_{now}	現時点でのサイクル長
$DirNum$	方向数
U_n	方向nにおける有効青時間(sec)
L	クリアランス時間(sec)
$H_{now}(n)$	方向nにおける単位時間あたりのホップ数総計

ただし、ホップ数の和を考慮した場合、車間距離に応じて 2 車両間での車両情報のホップ数が異なる場合があるため厳密な渋滞定義を行うことが難しい。また、東西車線の車両分布を考慮した場合、“和”を利用することで車両情報集計は容易になるものの、①東向き車両 5 台、西向き車両 5 台と②東向き車両 1 台、西向き車両 9 台との区別がつかないことが課題となる。

4.4 サイクル長制御

サイクル長とは青信号が点灯してから再び青時間が点灯するまでの時間であり、サイクル長を延長すれば有効青時間が長くなり、交通容量を拡張することが可能である。ただし、交通需要 (設計交通量) に見合ったサイクル長でなければ逆に渋滞を巻き起こすこととなるため、その長さを調整する必要がある。従来手法では、適応的に自動調整を行う場合、感知器による交通量カウントによりその長さを調整していた。

本手法では前方伝播方式によってその時点での車両通過前の予想交通量を取得することが可能であるため、1 サイクル前の単位時間あたりのホップ数の比較によってサイクル長を増減させることとする。まず、サイクル長はその最小値と最大値を超えない値とし(式 3)、

すべての方向に対して前サイクルでの単位時間あたりのホップ数増加した場合はサイクル長を+1秒, 逆に減少した場合はサイクル長を-1秒することとする(式4, 5). サイクル長 I については各交差点の交通容量に従い固定値で運用するものとする.

$$C_{\min} \leq C_{\text{next}} \leq C_{\max} \quad (3)$$

$$\text{if}(H_{\text{past}}(l) < H_{\text{now}}(l)) I \cdots I (H_{\text{past}}(n) < H_{\text{now}}(n)) \quad (4)$$

$$\text{then } C_{\text{next}} = C_{\text{now}} + I$$

$$\text{if}(H_{\text{past}}(l) > H_{\text{now}}(l)) I \cdots I (H_{\text{past}}(n) > H_{\text{now}}(n)) \quad (5)$$

$$\text{then } C_{\text{next}} = C_{\text{now}} - I$$

C_{\min}	最小サイクル長(sec)
C_{\max}	最大サイクル長(sec)
C_{next}	次サイクルのサイクル長(sec)
$H_{\text{past}}(n)$	方向 n の1サイクル前の単位時間あたりのホップ総数

5. まとめ

本稿は車車間アドホック通信を利用した車両情報の伝播による信号機制御手法について提案した. 本手法ではアドホック通信による車両情報ブロードキャストを利用することで, 車両感知器が設置されていない区間における交通状況を反映したリアルタイム的な信号機制御を行うことが期待できる.

本提案手法の評価を行うため, 本稿ではシミュレーション評価に必要な各車両の車載機器や信号制御器について設計を行い, スプリットやサイクル長の調整方法について検討を行った. その上で, ①実世界の車両動向の不一致性や, ②広域範囲における系統信号機制御への未考慮, ③安全性を考慮したスプリット・サイクル長の調整などさまざまな課題が浮上した.

そのため, 今後は車両動作を含め, 車両走行シミュレータへの本方式の実装評価を行うだけでなく, 実運用信号機動作の解析を行い, より実世界に近い環境におけるシミュレーション評価を検討している. また, 系統信号機制御と提案手法のハイブリッド運用についても検討を行う予定である.

参考文献

- 1) 国土交通省: "平成 12 年 建設白書", 2001.
- 2) UTMS 社団法人新交通管理システム協会: "<http://www.utms.or.jp/>"
- 3) 交通工学研究会: "改訂 交通信号の手引", 丸善, 2006.
- 4) 交通工学研究会: "交通工学ハンドブック", 丸善, 1984.
- 5) 田島, 小林: "次世代信号制御方式の開発と実証実験", *SEI テクニカルレビュー*, Vol.166, pp.51-55, 2005.
- 6) M. Saito, J. Tsukamoto, T. Umedu and T. Higashino: "Design and Evaluation of Inter-Vehicle Dissemination Protocol for Propagation of Preceding Traffic Information", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.8, No.3, pp.379-390, 2007.
- 7) T. Fujiki, M. Kirimura, T. Umedu and T. Higashino: "Efficient Acquisition of Local Traffic Information using Inter-Vehicle Communication with Queries", *10th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2007)*, pp.241-246, 2007.
- 8) E. Teramoto, M. Baba, H. Mori, H. Kitaoka, I. Tanahashi, Y. Nishimura, et. al.: "Prediction of Traffic Conditions for the Nagano Olympic Winter Games Using Traffic Simulator: NETSTREAM", *Proc. of 5th World Congress on ITS*, Vol.4, pp.1801-1806, 1998.
- 9) 交通工学研究会: "改訂 平面交差の計画と設計-基礎編- 第2版", 丸善, 2004.
- 10) M. Torrent-Moreno, D. Jiang and H. Hartenstein: "Broadcast Reception Rates and Effects of Priority Access in 802.11-based Vehicular Ad-Hoc Networks", *Proc. of 1st ACM Int. Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, pp.10-18, 2004.
- 11) T. Rappaport: "Wireless Communications: Principles and Practice, Second Edition", *Prentice Hall*, 2001.
- 12) 平成 17 年度 道路交通センサス: "<http://www.mlit.go.jp/road/census/h17/index.html>"