

交差点における交通制御を目的とした ITS の検討†

大谷 史郎*・秋月 治**・六浦 光一***
半田 志郎****・大下 眞二郎*****

ABSTRACT A number of accidents occur in an intersection because of the driver ignoring a traffic light and because of not being able to see far ahead in an intersection. Also, an intersection causes traffic congestion. In order to resolve these problems, in this paper, we proposed traffic control system which enables smooth traffic flow without traffic lights in the intersection. In this system, the cars near the intersection inform each other of their location and speed. Basing on these information, the cars control their speed in order to pass the intersection alternately. We evaluate the performance of this system by computer simulation for the model taking into consideration right turn and left turn. The results of the simulation show that this system is superior to the conventional traffic control system with traffic lights.

1. まえがき

現在は車社会といわれ、車両台数が年々増加しており、その一方で交通事故も同様に増加し続け、年間1万人前後の死者がでていいる。また、物流の自動車交通への依存等による渋滞発生、排気ガス等による環境汚染など、自動車交通におけるさまざまな問題点は、解決の糸口さえつかめていないものが多い。このような問題に対し、情報通信技術の発展をベースに解決を図る高度道路交通システム(ITS: Intelligent Transportation System)が注目されている¹⁾。特に、信号無視や見通しの悪い交差点での出会い頭による事故、および渋滞など交通状況を悪化させる要因の多くが交差点付近で発生しており、交差点における交通の円滑化が望まれている。この問題を解決するために信号機制御による交通の円滑化の研究が行われてきた²⁾。しかし、信号機による制御は交通容量を増加させることは可能であるが交通事故の点ではまだ完全に解決できているとは言い難い。

ITS for Traffic Control in an Intersection. By Shirou Otani (Aisin AW Co., Ltd.), Osamu Akizuki (School of Project Design, Miyagi University), Kouichi Mutuura (Faculty of Economics, Shinshu University), Shirou Handa and Shinjiro Ooshita (Faculty of Engineering, Shinshu University).

* アイシン・エイ・ダブリュ(株)

** 宮城大学事業構想学部

*** 信州大学経済学部

**** 信州大学工学部電気電子工学科

† 2004年11月1日受付 2005年3月8日再受付

そこで事故や渋滞の問題を同時に解決する手段として車両の自動化運転があげられ現在実用化に向けて各国で研究、開発が行われている^{3,4)}。しかしこれらの研究は主に直線道路においてプラトーン走行を行うものであり、全体的な交通ネットワークを考慮した場合、交差点で利用可能な自動運転制御システムが必要不可欠である。

そこで本論文では、交差点付近において周囲の車両と通信を行うことで、車両の位置および速度情報を互いに把握し、信号機を用いるよりもさらにスムーズに走行することが可能な交通制御システムを提案する。さらに、計算機シミュレーションによりその性能を評価し、提案システムと信号機を用いた現行システムの比較検討を行い、提案システムの有効性を示す。

2. システム構成

2.1 通信方式

現在のITS分野において、光センサー等を用いて前方の車両との距離を測り、自動的に加減速を行うシステムは実現されている³⁾。しかし、これらはおもにプラトーン(隊列)走行を想定したもので、同一方向に走行する車両が車群を形成している場合には有効であるが、本論文で対象としているような不特定車群の協調走行を必要とする交差点においては使用できない。そこで、本論文では、無線による車車間通信を行い、交差点や高速道路での合流部分等への拡張を実現する。その際、P2Pモードの無線LAN技術、マルチホップネッ

トワーク等を用い、これらを光センサー等による前方の車両との距離測定やGPSによる位置情報と組み合わせることで⁹⁾車両の速度・位置等の情報を交換しながら通信を行うものとする。

2.2 ネットワーク構成

車車間通信を用いたネットワークの構成方法について以下に述べる。まず交差点以外の場所では1対1の車車間通信を行い、マルチホップで隣接する車両に次々と自車両ID、自車両の位置、速度、右左折のある交差点においては右左折情報等のデータを渡すことでネットワークを形成する。これにより同一方向に走行する車両間で車群を形成し、車群内での自律分散的な制御を可能とする。また交差点付近については各方向から交差点に進入しようとする車両と同時に通信する必要があるため、同一方向に走行する車群内の先頭車をサーバー車として、交差点付近では各方向から交差点に進入しようとするサーバー車間で通信を行うことにより、サーバーネットワークを形成する。この際、サーバー車は、GPS等を用いて自車両の位置及び交差点の位置を把握できるものとする。

上記の2種のネットワークを構成するために、各車両にはサーバーネットワーク用の送受信機と車群内の通信に用いる送受信機をそれぞれ設置する。その際、**図1**に示すようにサーバーネットワーク用の送受信機は、各方向から来る車両と通信を行うために車両の中央に設置し、同一車群内の通信には、前後の車両のみとの通信を可能とするため、車両の前方、後方にそれぞれ指向性のあるアンテナを設置し、対向車等からの干渉電波を抑制する⁶⁾。

車群の先頭で交差点に接近しサーバー車となった車両は、最初に、サーバーネットワークが既に構成されているか否かを調べる。サーバー用送受信機では同一車群用送受信機とは異なる通信チャネルを用い、サーバー用受信機に信号がなければネットワークが存在しないと判断した場

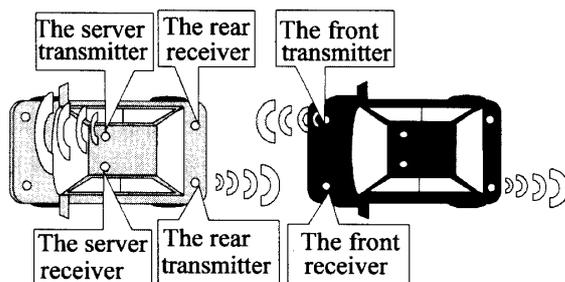
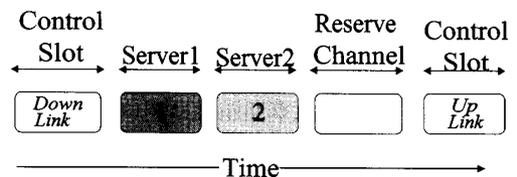


図1 通信機器の配置

合、そのサーバー車はサーバーネットワークでの基地局の役割を果たすことになる。このサーバー車をサーバーCSとする。サーバーCSは**図2**に示す下り用制御スロットを用いてブロードキャスト方式により、他のサーバー車がサーバーネットワークに参加するまでの期間、継続的に同期情報を送信する。その後サーバーネットワークに参加するサーバー車は、この同期情報にしたがって上り用制御スロットを用いてネットワーク参加要求を送信する。ネットワーク参加要求を受けたサーバーCSはネットワーク参加応答と共に参加要求サーバーの割り当てタイムスロット情報を送信する。これにより参加要求サーバーは指定されたタイムスロットを用いて通信を開始することが可能となる。サーバーCSが交差点を通過した後は、最も遅くサーバーネットワークに参加したサーバーがその役割を担うこととなる。そのためサーバーネットワークでは、サーバー車全4台が通信を行う際にも予備チャネルを用意し、そのチャネルを用いてサーバーCS変更用情報やその他緊急停止時のスクランブル情報等の制御情報を送信する。サーバー車が複数存在し、サーバーネットワークが構成された後は、各サーバー車は位置及び速度情報を相互に送信する。また、右左折のある交差点においては右左折情報等も加えて送信する。サーバー車は、自車両の情報および車群内の後続車両の情報を、走行順に送信する。また、サーバー間での情報伝達により得られた他車群の情報は、後方の送信機を用いて自車群に送信する。交差点を過ぎたサーバー車はサーバー変更通知を後方車両に送信した後、前方にのみ情報を送信し始める。この際、車群の後続部があれば、その先頭車両が新たにサーバー車となる。

情報伝達の順序について**図3**を用いて説明する。同図において、①車群の後方車両から前方に向けてマル

When the number of servers is two



When the number of servers is four(Max.)

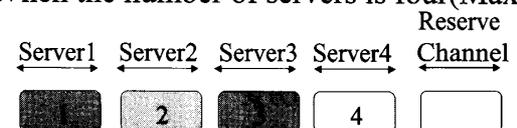


図2 サーバーネットワークのタイムスロット構成

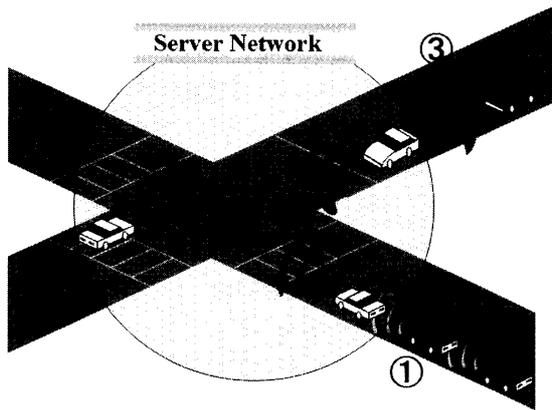


図3 ネットワーク構成

チホップにより伝達された情報は、車群の先頭にいるサーバー車に集められ、②サーバー車はサーバーネットワークを形成しサーバー間で情報の伝達を行い、③他車群の情報がサーバー車から車群内に伝達される。これにより交差点以外の場所も含めたネットワークを構築し、交差点付近の全端末が他車の情報を得ることができる。なお、本論文においては制御を主に考慮しているため、その他の通信条件等については、遅延、伝送誤り等の無い通信が確保されると仮定している。

3. 車両制御方式

3.1 交差点以外の場所での制御方式

本論文では、前方の車両との衝突が起こらないモデルとして、二段階で減速を行う方法を用いた減速モデルを用いる⁶⁾。現在の車両におけるフルブレーキング性能は約0.5Gであり54km/hで走行する車両の制動距離は約23mを必要とする。そのためブレーキを0.5Gと0.25Gの二段階設定する。すなわち、第一段階では前方車両の位置及び速度情報を元に、前方車両との車間距離が60mとなった時点で、前方の車両の方が速度が遅い場合に0.25Gで減速し、第二段階では車間距離が30m未満となった時点で、前方の車両の方が速度が遅い場合にはフルブレーキの0.5Gで減速する。なお、前方との車間距離が60m未満であっても前方の車両の方が、速度が速い場合には車間距離は開いていくのでそのままの速度で走行する。一方、車間距離が60m以上であり、自車の速度が最高速度(54km/h)に達していない場合には0.25Gで加速する。以上の速度制御を短い時間で繰り返し行う。

3.2 交差点での制御方式

本節では、交差点での制御方式について述べる。本節では、右左折のない場合についての制御方式につい

て述べ、右左折のあるモデルに関しては、次節で述べる。交差点付近の車両は交差点をスムーズに走行するため、各車群の先頭車(サーバー車)が交差点を越すまでの時間により、各方向から交差点に進入するサーバー車に優先度をつける。そして優先度の高い車両から順に交差点を走行する。優先度は交差点を通過するまでの時間が最も短い車両を優先度1とし、時間が長くなるにつれて2,3,4と増加していくものとする。

ここで優先度を*i*、優先度*i*の車両が交差点に進入するまでにかかる時間を Tr_i 、優先度*i*の車両が交差点を走行する時間を Tk_i とすると優先度*i*の車両が交差点を越すまでにかかる時間は

$$T_i = Tr_i + Tk_i \quad (1)$$

となる。また、本論文ではシステムの安全性を高めるためにガードタイム(GT)を設けた。したがって、優先度*i-1*の車両が交差点を越すまでにかかる時間にガードタイムを足した時間 $T_{i-1} + GT$ に、優先度*i*番目の車両が交差点に進入するよう制御する。すなわち

$$Tr_i = T_{i-1} + GT \quad (2)$$

とする。式(2)を満たすためには減速度をその都度変化させる必要がある。その際の減速度は、減速度と位置の関係式

$$x_i = V_i Tr_i - (1/2) a Tr_i^2 \quad (3)$$

と式(2)から以下のように定まる。(優先度1の車両については減速する必要が無いので0とする。)

$$a_i = \frac{2((T_{i-1} + GT) V_i - x_i)}{(T_{i-1} + GT)^2} \quad (T_0 = 0) \quad (4)$$

T_i : 優先度*i*の車両が交差点を越える時間

x_i : 優先度*i*の車両の交差点までの距離

V_i : 優先度*i*の車両の初速

GT : ガードタイム

ただし、図4(a)に示すように初速度 V_i が $V_i < 2x_i / Tr_i$ となるとき交差点進入時の速度は正となるが、 $V_i = 2x_i / Tr_i$ でちょうど交差点の直前で停止することとなり、図4(b)に示すように $V_i > 2x_i / Tr_i$ では交差点進入時の速度が負となる。したがって、この場合には図4(b)に示すように式(2)で求まる時刻より前に交差点手前に到達し、優先度が高い車両が交差点内を走行し終えるまでまって交差点に進入するようにする。そのときの減速度は交差点までの距離と初速度を用いて以下のように定める。

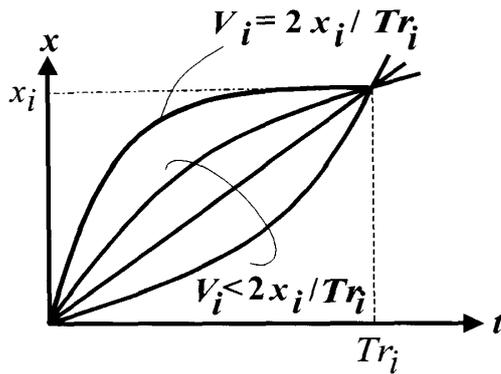


図4(a) 初速度と交差点通過時の速度

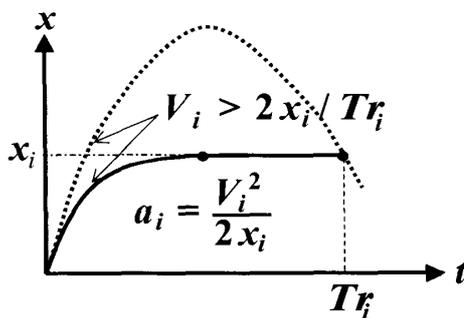


図4(b) 初速度が所定値を超える場合

$$a_i = \frac{v_i^2}{2x_i} \quad (5)$$

3.3 右左折を考慮したシステムモデル

前節では、右左折のないモデルに関して、交差点での制御方法を述べた。本節では、これを右左折のある一般的なモデルに拡張するため、3.2節に加えて新たにいくつかの条件を設定した。与えた条件を以下に示す。

- (1) 右左折車は、交差点の直前までに最大速度15km/hに減速する。
- (2) 他車両との干渉がなく、右左折のためだけに減速する場合の減速度は0.25Gとする。
- (3) 他車両と干渉した結果、交差点手前で停止した場合、または交差点手前の速度が15km/hより遅い場合は交差点内で最大15km/hまで加速して交差点を走行する。またこのときの加速度は0.25Gとする。
- (4) 表1の道路モデルに基づき、右折車は半径7.5m、左折車は半径2.5mの1/4円上を等速で交差点内を走行する。
- (5) 自車両が右折する場合に、右方向から来る車両が左折車である場合、または全方向の車両が左折車である場合のように、お互い干渉せずに右左折を同時に行うことが可能であるような場合、各車両

表1 道路及び車両モデルに与えた条件

道路長/道路幅	1 km / 10 m
交差点幅	10 m × 10 m
車両長/車両幅	5 m / 2 m
車両速度	0 ~ 54 km/h
ブレーキ(減速度)	0 ~ 0.5 G
アクセル(加速度)	0.25 G

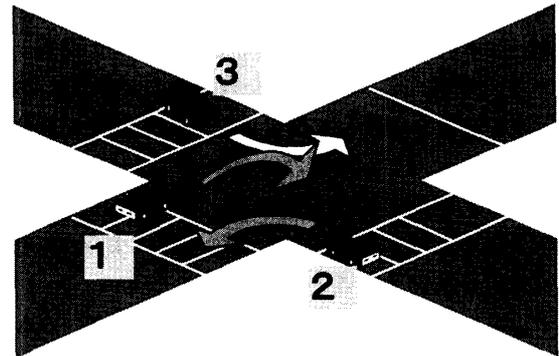


図5 右左折を含めた優先度

は優先度に関係なく15km/hで交差点内を走行する。

以上の5項目の条件を付加し、交差点に進入する優先度は3.2節と同様に交差点に進入するまでの時間が最も早い順に優先度を割り振る。ただし本方式では交差点に進入するまでの時間のみに優先度を決定するため、右折車両に関して直進左折車両と同様な優先度で交差点を通過することができる。つまり交差点に進入するまでの時間が早ければ、右折車であっても優先度が高くなり、右折者が交差点を過ぎてから次の車両が交差点に進入できるように直進または左折車の方が減速を行う。また本方式では条件を満たせば右左折車が同時に交差点を走行することを可能としているため(条件5に記載)、図5に示すような状態になった場合、優先度1と2の車両と優先度2と3の車両はそれぞれ干渉しないため優先度に関係なく条件1,2に基づき走行するが、優先度1と3は干渉対象となっているため、優先度3の車両は優先度2の車両の交差点に進入するまでの時間に関係なく優先度1の車両が交差点を過ぎた後に交差点に進入できるように走行する。特に片側1車線の道路においては、右折車が1台あることによって後続の直進・左折車両が交差点に進入できない現象が改善され、渋滞緩和に大きく寄与する。

以上、本章では全車両がシステムを搭載している場合の、片側1車線の道路に関して提案方式の説明を

行った。ここで、2車線以上の道路への拡張について考察を行う。2車線以上の道路においては、各車線を走行している車両は、車群を構成して車群内でマルチホップネットワークを形成し、1車線の場合と同様な手順で、位置情報及び速度情報をやり取りし、その情報を元に車両制御を行う。提案システムでは、3.1節で述べた速度制御方式によって車両は協調走行しており、交差点付近以外では、各車群間で通信を行い、車線変更等の制御を行う。交差点付近では、各車群の先頭車両が、他車群の先頭車両との間でアドホックなネットワークを構成し、スムーズな合流のために互いの位置・速度情報を交換して交差点に進入する優先順位を決定するとともに、車群の後方車両に対して、取得した他車群の情報を伝送することとなる。これにより、1車線の場合と基本的に同様な制御手順により、各車両が交差点を通過することとなる。

本論文では、全車両がシステムを搭載しているものとして議論を進めたが、故障等によってシステムが稼働していない車両が存在することがありうる。本章の最後に、故障等によってシステムが稼働していない車両が存在する場合に関して考察を行う。まず、片側1車線の道路に関しては光センサー等による距離測定によって前方車両の存在を知り、この車両からの受信が無い場合には、追従走行を行った後、交差点付近ではサーバーネットワークを用いて、全車両の交差点への進入を抑止し、システムの稼働していない車両が目視で交差点を通過することを可能とできる。また、2車線以上の道路においても、片側1車線の道路と同様の手順で、システムの稼働していない車両の存在を検知し、その情報を各車群に伝送する。これにより、1車線の場合と基本的に同様な制御手順により、システムの稼働していない車両の交差点通過を可能とできる。

4. 計算機シミュレーション

本章では、3章で提案した方式を、シミュレーションを用いて評価する。本章では、最初にシミュレーションモデルを示し、次に比較対照とした現行システムの交差点の制御モデルを示した後、提案方式に関する評価結果を示す。

4.1 シミュレーションモデル

本論文では、片側が5m幅の車線が1車線ずつの全2車線道路の、南北、東西それぞれ1,000mの区間を、シミュレーションの対象とし、この1,000mの区間の中央部に10m幅の交差点が1カ所存在するものとした。表1に、道路モデル及び車両モデルを示す。車両は東西

南北の各道路端においてポアソン生起し、54km/hで対象区間に進入するものとする。ただし前車との車間距離が25m未満の場合、車間距離が25m以上になるまで対象区間の手前で停車しているものとする。従って、車両密度が増加してくると一定間隔で対象区間に進入する。また右左折のあるモデルでは、右左折および直進車はそれぞれ1/3の確率でランダムに対象区間に進入するものとする。すなわち、車両密度は進行方向に関わらず等しいものとした。

4.2 信号機を用いたモデル

本論文では比較対象として信号機を用いたシステムモデルを想定する。信号機を用いたモデルの道路及び車両モデルは表1と同様である。減速および加速について与えた条件を以下に示す。

- (1) 交差点に最も近い車両は交差点からの距離が100m～25mの段階で信号が黄色か赤であれば交差点に入る手前で停止できるように減速を開始する。
- (2) 交差点からの距離が25mより近い位置で信号が青から黄色に変わった場合、速度が54km/hであればそのまま走行し、54km/hより遅ければ0.25Gで加速する。
- (3) 前方の車両が信号により停止している場合には間隔を1.5mあけた地点で停止するように減速する。
- (4) 右左折のあるモデルにおいて与えた条件は上記と同じであるが、それに加え自車両が右折する時に対向車両が交差点から50m以内に存在する場合、信号が青でも交差点の手前で停止する。
- (5) 条件(4)によって停止した車両は対向車両の交差点までの距離が50m以上離れた場合、または信号が黄色になり対向車が停止した場合に最大15km/hまで加速して交差点を走行する。このときの加速度は0.25Gとする。
- (6) 自車両、対向車共に右折希望の場合は交差点からの距離が近い方が先に交差点に侵入する。
- (7) ここでは、単一の交差点を考慮し、また各方向への交通量を等しくしたので、信号サイクルは全車線の可能道路容量を等しくするため青信号25s、黄信号4s、赤信号31sで、全信号が赤の時間は1sとする⁷⁾。

4.3 直進のみ考慮したモデルに関する検討

表2は、提案方式においてガードタイムによって直前の車両が交差点を越して何m進んだ時点で次の車両が交差点に進入するかを示したものである。表よりガードタイムの増加に比例して交差点からの距離も増

表2 ガードタイムに対する安全性

ガードタイム	交差点からの平均距離
0.5 sec	5.8 m
1.5 sec	18.9 m
3.0 sec	39 m

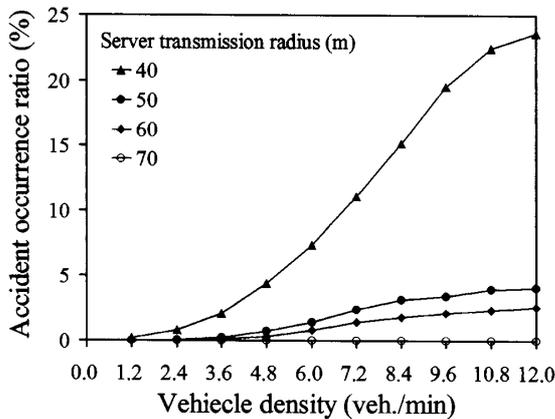


図6 事故発生率

加しており、ガードタイムの導入によって安全性の確保が可能になる。

図6はサーバーの伝送半径別の事故発生率を求めたものである。これは計算機上で1回の観測時間を10分とし、その観測時間内に事故が起きた場合、そのシミュレーションを停止する操作を1万時間分行い、交差点で発生する事故発生率を示したものである。同図より、伝送半径が60mを越したあたりから特性が良くなり、70mで事故回数を0にすることが可能であることが判明した。なお、本システムでは交差点進入までの時間を $T_{i-1} + GT$ としているが、この値は優先度が高い車両の走行時間 T_{i-1} に依存する。よって伝送半径が短い場合には、衝突を回避するためには0.5G以上の減速を必要とする場合が生じるが、本論文では最大減速度を0.5Gとしているため、このような状況となった場合に事故として扱っている。

図7は、評価基準として制御消費時間を用いてガードタイムごとの特性を示したものである。制御消費時間とは、車両制御を行うことにより、加減速しながら1km走行した時間と、54km/hの等速度で1km走行した時の時間の差を求めたものである。同図より、ガードタイムを増加させると制御消費時間も増加するが、信号機を用いたモデルと比べると良い特性を示すことがわかる。

図8は1秒あたりに交差点を通過する台数の平均を

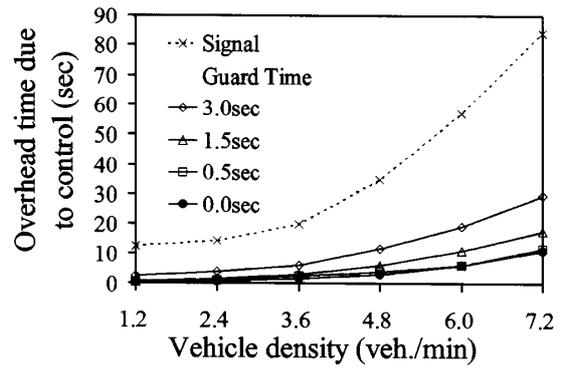


図7 制御消費時間

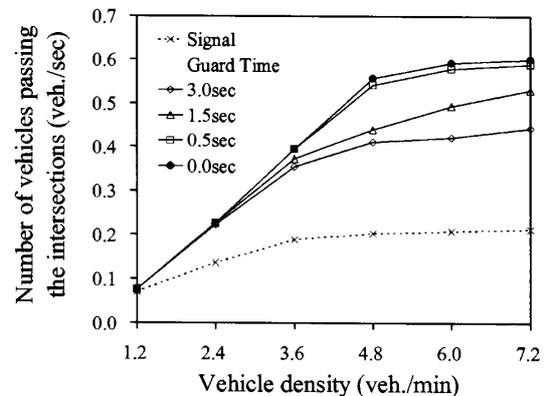


図8 交差点通過台数

示したものである。図6と同様に、ガードタイムが増加すると通過台数は減少するが、信号機を用いたモデルと比べると2倍ほど多くの車両が通過可能であることが明らかになった。また端末密度が高いところで交差点通過台数が一定であるのは、端末密度が高い所では交差点の手前ですでに渋滞が発生しており、交差点を通過できる台数の限界に達しているためであると思われる。信号機ありの現行モデルにくらべ、提案システムは一定になるまでの端末密度が高く、渋滞発生の抑制につながっていると考えられる。

4.4 右左折を考慮したモデルに関する検討

図9は、右左折ありの場合に関して、提案方式と信号機を用いたモデルの制御消費時間を比較したものである。信号機を用いたモデルでは、右左折ありと右左折なしの差が大きいが、これは、本論文で対象としている片側一車線の道路では、右折車が車群の先頭にあることによって後続の直進・左折車両が交差点に進入できないためである。これに対して提案システムでは、交差点付近で情報伝達をすることにより、右折車に関しても直進・左折車両と同等な優先度で交差点を通過

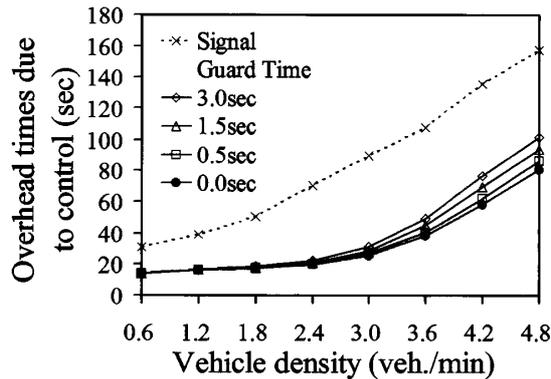


図9 制御消費時間(右左折考慮)

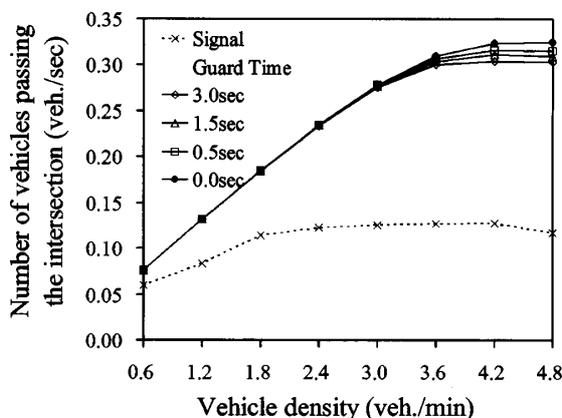


図10 交差点通過台数(右左折考慮)

することが可能であり、さらに交差点内で互いに干渉しない右折と左折を同時に行うことが可能である等により、ガードタイムを大きくした場合にも、右左折ありと右左折なしとの差がそれほど小さくなく、信号機を用いたモデルと比較して大幅に改善していることがわかる、これより、提案システムは右左折のある交差点に対して、より有効であることがわかる。

図10は、右左折ありの場合についての交差点通過台数を示している。この結果より、現行システム、提案システム共に右左折なしの時に比べると右左折ありの時は1/2倍程度に減少していることがわかる。これは右左折ありの場合には交差点手前で右左折が可能となる速度まで減速し、なおかつ交差点内では低速走行する必要があるため、走行時間が増加した結果、交差点を通過する台数が減少したものと思われる。

5. まとめ

本論文では、交差点付近で通信を行うことで、信号

機による制御方式よりスムーズに交差点を走行可能なシステムを提案し、計算機シミュレーションを用いて、信号機を用いたモデルとの比較によりその有効性を検討した。その結果、本システムでは、ガードタイムを導入し、伝送半径を70m以上にするにより衝突事故を生じることなく交差点を走行することが可能であることを示し、交通事故および交通渋滞に対して有効なシステムであることを確認した。

本システムは、信号機を用いたシステムに比べ、制御にかかる時間を大幅に削減可能であり、交差点の単位時間あたりの通過可能台数を2倍程度に増やすことが可能となった。またより現実的なシステムに近づけるため右左折のある場合においても考慮し、評価を行った結果、提案システムは右左折のある場合に、より有効であるという結果が得られた。

しかし、本論文での検討は全車両がシステムを搭載している場合の、片側1車線の道路に関してのみであり、また単一の交差点に関するものであった。2車線以上の道路に適応する場合の詳細な検討や、複数の交差点を含めた、系統信号システム方式等との比較は今後の課題である。また、システムを搭載していない車両が存在する場合について考察を行っているものの、システム非搭載車両の割合に対する評価も今後行う予定である。また、フェージング環境化においても確かな通信を可能とする通信プロトコルの作成や複数の交差点を考慮したシステム等が挙げられる。

参考文献

- 1) 松下 温, 屋代智之: ITSの通信基盤の展望と課題, 信学論(B), **J82-B-11**, 1950/1957, Nov. (1999)
- 2) 井上健士, 二村光信, 横田孝義, 佐野 豊: 渋滞時におけるイベントスキャン方式シミュレーションを用いたオフセット設計, 信学論(A), **J81-A-4**, 578/589, Apr. (1998)
- 3) 津川定之: 交通運輸システムのインテリジェント化—自動運転システム, 交通工学, **31-6**, 41/50 (1996)
- 4) 塚本晃司, 藤井雅弘, 伊丹 誠, 伊藤紘二: 信号衝突の回避と測距を実現する情報転送方式車々間通信ネットワークの検討, 信学会 2002年総合全国大会 A-17-7 (2002)
- 5) 森岡祐一, 寺師慎屋, 中川正雄: GPS 連携通信システムの提案及び実験, 信学技報, ITS2001-3, 13/18
- 6) マイケル・ロックラン, 中川生雄: 車車間通信における対向車からの干渉特性, 信学論(B), **J82-B-11**, 2034/2042, Nov. (1999)
- 7) アリ・ウイドド, 長谷川孝明: 車車間通信ネットワークを含めた高度交通システムの評価のための自律走行交通流シミュレーター, 信学論(B), **J82-B-11**, 2002/2009, Nov. (1999)
- 8) 井上広胤: 交差点, 技術書院 (1965)