

ITS 技術を利用した交差点信号制御の提案

宮西洋太郎、宮本衛市、前川禎男
(公立はこだて未来大学)

近年、ITS 関連技術の研究が活発に行われている。従来からカーナビに活用されている GPS によって、車両の位置を高精度に特定できる。また、道路と車両間の通信手段(路車間通信)の研究も活発に行われ、実用になりつつある。数十年来、交通流の解析やシミュレーションに関しても多くの研究がなされてきた。本稿では、個々の車両の状態情報(位置、速度など)を車両側において精度よく獲得でき、その情報を路車間通信によって道路側に伝達できるということを前提として、より効率的で安全性の高い交通管制システムの提案を行う。提案の一例として、交差点交通信号制御に的を絞って、制御方式を検討し、簡略化したシミュレーションによって、その効果を調べた。その結果、提案の方式は一定程度の効果が得られることが判明したが、方式の精査および模擬条件の範囲拡大を行い、実際の各種の場面での検討を行うことが今後の課題である。

A Proposal of Traffic Signal Control using ITS Technology Yohtaro Miyanishi, Eiichi Miyamoto, Sadao Maekawa (Future University – Hakodate)

Recently, ITS related technologies have been developed extensively. GPS provides precise position of a vehicle. The communication methods between vehicles and road facilities have been also developed and applied practically in some systems. Many works analyzing and simulating traffic flow have been developed so far. In this paper we assume that the precise position can be got on each vehicle and communications are available between vehicles and road facilities, and we propose a new traffic signal control method. Our proposal is to use each vehicle's state information and estimate the arrival time to a specific point of an intersection, and at that time, the signal light is to be controlled to green. We have made an evaluation of our proposal by a simple simulation. However, many issues are to be studied in the near future.

1. はじめに

近年、ITS 技術の研究が活発に行われている[1]。なかでも米国防総省が軍事目的に開発した GPS(Global Positioning System)は、車両の位置を高精度に特定することが可能なシステムであり、カーナビに応用され、民需としても大いに便宜を供している。GPS の精度を向上するためのディファレンシャル GPS などの各種の補強システムも実用になっている。一

方、道路と車両との間の通信手段(路車間通信)の研究も活発に行われ、VICS(Vehicle Information and Communication System)、ETC(Electronic Toll Collection)などで実用になりつつある。また数十年の歴史で、交通流の解析やシミュレーションに関しても多くの研究がなされ、多くの知見が得られている[2]。

本稿では、従来の研究をふまえ、個々の車両の状態情報(位置、速度など)を車両側にお

いて精度よく獲得でき、その情報を路車間通信によって道路側に伝達することができるという将来技術の可能性を前提として、より効率的で安全性の高い交通管制システム(Road Traffic Control System)の提案を行う。

本提案の一例として、交差点での交通信号の制御に的を絞って、信号制御方式を具体化し、単純化した条件のもとでのシミュレーションを行い、本提案の効果を調べる。

提案する信号制御方式は、交差点に接近する個々の車両の位置と速度情報を利用して、当該車両が交差点に到達する時刻を予測し、その時刻に信号を青信号とする方式である。類似の研究として PTPS (Public Transportation Priority System) があり、公共車両を優先的に交差点を通過させるシステムが研究されている。本提案は、公共車両ではなく、一般車両もできる限り効率的に交差点を通過させることを目標としている。

シミュレーションの結果、提案する方式により一定程度の効果が得られることが判明したが、シミュレーション条件の範囲を拡大し、実際にありうる各種の場面での検討を行うことが今後の課題である。

2 . ITS 技術の交通管制への適用

現在の道路交通体系に対する問題認識として、昭和 30 年代以降、高速道路においても、一般道路においても、道路交通のスピードアップは停滞しており、世の中の高速化に対応できていないという点が挙げられる。

具体的には、昭和 30 年代に名神高速道路が建設されて以来、最高速度は 100km/h に制限されているし、市街地においては、安全性のため、むしろ最高速度は抑制される傾向にある。

この問題に対し、情報技術 (IT) を用いることによって、安全性と効率性を両立するよう

な高速化ができないものかというのがここでの問題提起であり、検討テーマである。

2 . 1 高速道路における交通管制の提案

従来、高速道路においては、車両の走行を支援、または規制する手段は、ハイウェイラジオや道路標識などであった。近年では、VICS などが利用可能となっている。しかし、走行そのものは運転者の判断に完全に委ねられている。運転者相互の意思疎通手段も方向指示器、ブレーキランプ、ハザードランプ、パッシングランプなど、ごく限定された目視的手段が利用できるのみであり、運転者相互の合意が形成されずに、本線進入や車線変更がなされている。そのため、安全を確保するには、最高速度を 100km/h 程度に制限せざるを得ない理由の一つになっていると考えられる。

現在の民間航空機の IFR (計器飛行方式) では、最終的にはパイロットの判断で飛行がなされるが、基本的には航空管制官から管制を受けて安全かつ効率的に飛行がなされているように、我々は、高速道路においては、道路側からの管制を受けて走行する方式、または運手者相互の意思疎通による合意形成の後に走行する方式を提案する。

航空機の数と自動車の数は大幅に異なり、航空における管制官のような人手による管制は非現実的であり、管制官に相当する機能をコンピュータによって自動化する必要がある。

高速道路における交通管制は、インターチェンジ、ジャンクションポイントやサービスエリアにおける本線への合流時および車線変更時に必要とされるであろう。

高速道路合流点における交通管制案を図 1 に示す。図において、合流しようとする車 は、本線を走行中の車 と競合を起こす可能性があるものとする。車 は自己の計画加速パター

ンを添付して、管制所に本線進入の許可を要請する。管制所は車、の走行を予測し、車の走行に支障が無い場合に、車に本線進入を許可する。車は計画加速パターンに従って加速し、本線に進入する。支障がある場合には、管制所から車に加速パターンを指示する。加速パターンには、停止待機も含む。車は指示された加速パターンに従って加速していくことにより、安全に本線に進入することができる。車も合流車との安全が確保されているので、従来に比べ、速度を減速させることなく、安全に走行することができる。

交通量が多くなり、上記の方式で、車が進入できない場合には、本線走行中の車に対しても減速の指示を与える。

ただし、これらのいずれの場合も、最終的な安全確保は運転者の判断に委ねるものとする。

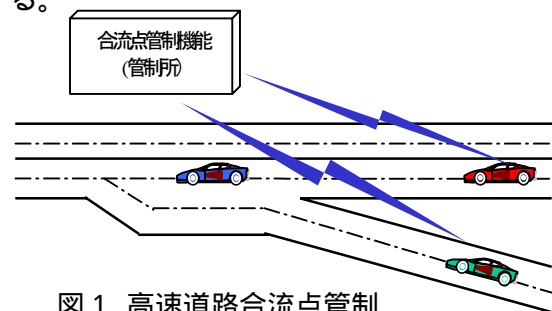


図1 高速道路合流点管制

高速道路車線変更における交通管制案を図2に示す。図において、車線変更をしようとする車は、追い越し車線を走行中の車と競合を起す可能性があるものとする。車は車線変更の要請を管制所に行く。管制所は車に対して、車の車線変更を認めるように要請する、通常は、車が認め、車に対して車線変更を許可する。事情により、車が認めない場合には、車に対して車線変更を許可しない。

これらの動作は、管制所を経由せず、車相互に交渉を行う(車車間の交渉)ことでも実現でき、交渉が成立しない場合の調停の役割を管

制所にもたせることもできる。管制を行うべき地域は広範であり、管制所の地理的な配置の問題も含めて、方式の詳細は今後の検討としたい。

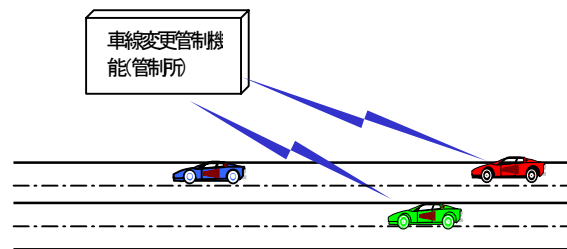


図2 高速道路車線変更管制

2.2 一般道路における交通管制の提案

一般道路においては、言うまでもなく交通管制の最も重要な手段は交差点における交通信号である。信号制御方式は数十年の歴史があり、地点制御、系統制御、広域制御と発展してきた[2]。交通需要の少ない交差点では、車両の接近を感知して、一定時間後に信号を変える方式や、交通需要が変動する交差点では、交通量に応じて信号制御パラメータを適応させる感应式制御方式も実用になっている[3]。また、前述のPTPS方式も研究されている[1]。

提案方式の目的は、個々の車両の状態情報を利用し、従来よりもきめ細かな信号制御を行い、旅行時間あるいは遅延時間を短縮することである。一般道路交差点における提案方式による交通管制案を図3に示す。我々は、管制所において、全方向から接近する車の状態情報(位置、速度、など)を常時(短い周期で)受信し、各車両の速度と位置から各車両の交差点到達時刻を予測し、その時刻で信号が青となるような信号制御を行う方式を提案する。今回シミュレーションを行った具体的な信号制御方式については、3.2において述べる。

従来方式に、交差点4方向の交通量を感知し信号制御する全感应式制御方式がある。その特殊形として速度感应式制御[3]があり、接近する車両の速度に応じた単位青時間の延長が

なされるが、この方式では、速度情報は交差点到達時刻の予測には用いられていない。

提案の方式により、交差点での旅行時間または遅延時間の減少、交差点の飽和交通流の増大、排ガスの低下、燃費の向上が得られるものと期待できる。

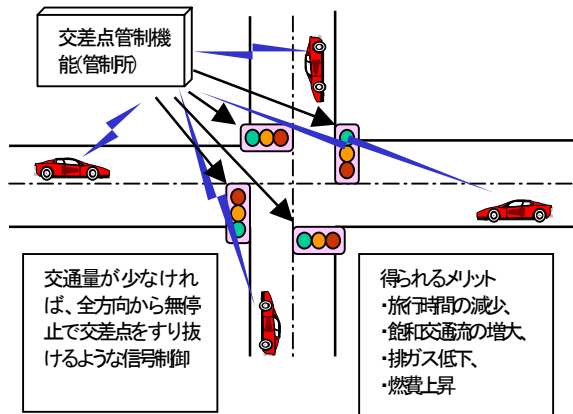


図3 一般道路交差点管制

3. シミュレーションモデル

上記の提案の一部として交差点での信号制御をシミュレーションによって実験し、効果を調べる。今回のシミュレーションは交差点の一方方向の道路のみを対象とする簡略化したモデルによる。まず従来方式として、信号が個々の車両の状態と関係なく制御される場合の定周期信号制御方式を模擬したシミュレーションを実施する。次に本提案による信号制御を模擬したシミュレーションを実施する。両者の比較により、提案方式の効果を評価する。

3.1 従来方式のシミュレーションモデル

図4に、定周期信号制御方式が行われている交差点のモデルを示す。

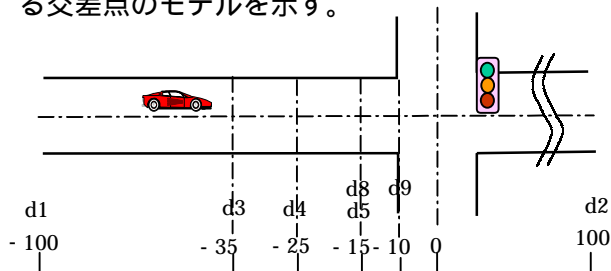


図4 シミュレーション交差点

以下にシミュレーションの条件を列記する。

(1) 道路、信号の条件

- ・乱数のシード(種): 毎回指定
- ・サンプリング周期: $dt=0.01\text{sec}$
- ・シミュレーション時間: $igmax=12000000$ カウント(120000sec)

・対象道路範囲: $d1=-100\text{m}$ から $d2=+100\text{m}$ (交差点の中心を起点 0m とする。)

・道路の幅: 20m 、停止位置: $d5 = -15\text{m}$ 。

・第1判断区間: $d3 = -35\text{m}$ 、 $d4 = -25\text{m}$ 。

(車はこの区間で信号を見て、交差点を通過するか否かを判断する。信号が黄、赤の場合には停止位置に停止する。)

・停止時の車頭距離: $d6=5\text{m}$

・ 50Km/h 走行時の車頭距離: $d7=10\text{m}$

(速度に応じて $d6$ と $d7$ で決まる直線上の車頭距離を維持する。)

・第2判断区間: $d8=-15\text{m}$ 、 $d9=-10\text{m}$ 。

(停止後、青信号で発車したが、この区間にあるとき、黄信号に変化した場合、再び停止する。)

・信号青(green)時間: $gtime=26\text{sec}$

・信号黄(amber)時間: $atime=2\text{sec}$

・信号赤(red)時間: $rtime=32\text{sec}$

(定周期信号制御方式: 信号を車両とは独立に周期的に変化させる)

(2) 車両の条件

・車両走行速度: $v1=10\text{m/sec}$

・交通量: ポアソン流 q 台/sec (変化させる)(発生時、速度 $v1$ での車頭距離を確保する。)

(3) 車両の状態: 車両の動特性を状態遷移で模擬する。

・車両の状態:

$dstate=00$: 初期速度にて通常走行中、

$dstate=01$: 交差点で停止後、加速し、初期速度に到達し、通常走行中、

dstate=10：青信号により、加速中、
 dstate=20：停止のために減速中、
 dstate=21：青信号で加速しようとしたが、
 黄信号に変わり、減速中、
 dstate=30：信号待ちで停止中

(4) 状態遷移条件 (概略)

・00 20：(第1判断区間で信号が黄または赤)

または(d4 から d5 の間で速度が v1 の 1/2 以下で信号が黄または赤)

・20 30：速度が閾値 vstop(0.02m/sec)以下

・30 10：信号が青

・10 01：速度が初期速度に到達

・00 30：先頭車両ではなく、先行車両が停止して、速度が閾値以下

・10 21：第2判断区間で信号が黄または赤

・20 10：信号が青

・21 30：速度が閾値以下

(5) 各状態における処理

・00：なし、次の(6)の処理へ

・01：なし、次の(6)の処理へ

・10：現在速度 v2 を加速度 accalpha (2.0m/sec²)で dt 時間分加速する。

・20：停止中の車と先行車の台数をカウントし、自車の停止位置を計算する。そこに停止するための減速度 decalpha を計算する。減速度が下限値 decalpha2 (-12.0m/sec²)を下回る場合には下限値とする。計算した減速度で、現在速度 v2 を dt 時間分減速する。

・21：減速度 decalpha2 で現在速度 v2 を dt 時間分減速する。

・30：現在速度を 0.0m/sec とする。

(6) 車頭距離のチェック

現在速度 v2 に対応した車頭距離 distance を線形で計算する。先行車との車頭距離が distance より小さければ decalpha2 で現在速度 v2 を dt 時間分減速する。distance の

1.1 倍より大きければ、accalpha(2.0m/sec²)で現在速度 v2 を dt 時間分加速する。

(7) 現在位置の更新

次の(1)式により、現在時点 n での位置 x1 を現在速度 v2 で dt 時間分進める。

$$x1(n) = x1(n-1) + v2(n) * dt \quad (1)$$

3.2 提案方式のシミュレーションモデル

図5に本提案方式信号制御を行っている交差点を示す。

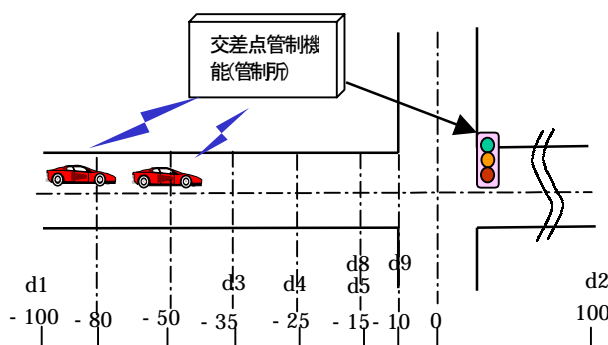


図5 提案方式シミュレーション交差点

信号制御のタイミングは、ある車両が信号手前の-80m、-50m 到達時、以下の処理を行う。

当該車が先頭車である(自車位置から d2 まで他の車両が存在しない)こと、または1つ前の先行車が d9 を通過していること。

(1) 現在信号が青表示の場合

現在信号が青表示の場合には、当該車両が d9 地点を通過するまで青信号を延長することとする。現在時刻を t_{now} として、当該車の速度 v2 で走行した場合の d9 地点到達時刻 t_{d9} を下記の(2)式で計算し、その時刻まで青信号を延長する。ただし、クロス方向の交通に対し、平均的に影響を抑えるため、青信号を延長した場合、次の青信号表示時に、直前で延長した分を短縮することにする。時間延長は次の車両が接近した場合にも同様の延長処理を行い、延長時間を累積していくが、このとき、次回表示の青信号の最小表示時間を定め、青信号延長の歯止

めとしている。延長可能な場合には延長し、当該車両に交差点通過許可を与える。

$$t_{d9} = t_{now} + (d9 - (-80)) / v2 \quad (\text{at } x1 = -80m)$$

$$t_{d9} = t_{now} + (d9 - (-50)) / v2 \quad (\text{at } x1 = -50m)$$

(2)

(2) 現在信号が赤表示の場合

現在信号が赤表示の場合には、当該車両が停止位置に到達する時刻に信号を赤から青表示に切り替えることとする。上記の(2)式と同様に、当該車の速度 $v2$ で走行した場合の $d8$ 地点到達時刻を計算し、その時刻に赤から青表示に切り替える。ただし、クロス方向の交通に対し、平均的に影響が無いようにするため、赤信号を短縮した場合、次の赤信号表示時に、直前で短縮した分を延長することにする。このとき、赤信号の最小表示時間(すなわちクロス方向の青時間の最小表示時間)を定め、赤信号短縮の歯止めとしている。短縮可能な場合には短縮し、交差点通過許可を与える。当該車両が第1判断区間 $[d3, d4]$ 通過時、通過許可が出されていると、その後の $d5$ 地点で青信号に切り替わることが保証されているので、信号が赤信号でも進行できることとする。通過許可は管制所から車両個別に通知され、適切な表示装置によって運転者に表示されるものとする。

4. シミュレーション

(1) 従来方式、提案方式共通のシミュレーションの条件

- ・ 車両速度 $v1=10m/sec$ 、
- ・ $gtime=26sec$ 、 $atime=2sec$ 、 $rtime=32sec$
(従来方式では、これを周期的に繰り返す。提案方式では、前述の処理を行うが、最短赤時間 $12sec$ 、最短青時間 $10sec$ とする)

- ・ シミュレーション時間幅： $120000sec$
- ・ 擬似乱数シードを変えて5回繰り返す。

(2) シミュレーションの結果評価項目

- ・ $-100m$ 地点から $+100m$ 地点までの旅行時間
- ・ 平均旅行時間および旅行時間の確率分布
($0.5sec$ きざみのヒストグラム)
- ・ 無停止率

交差点を無減速、無停止で通過する確率を無停止率ということにする。その場合、旅行時間は $20.0sec$ である。無停止率は概略 $gtime/(gtime+atime+rtime)=26/(26+2+32)=0.433$ である。無停止で通過する場合でも、前方の赤信号で減速中に青信号に変化し、交差点を無停止で通過することもあるので、 $20.0sec$ よりも若干大きい値になる場合もある。

(3) シミュレーション結果

従来方式と提案方式のシミュレーション結果を表1に示す。ヒストグラムの一例を図6および図7に示す。

表1 従来方式と提案方式の結果比較

		従来方式	提案方式
q=0.02 (台/秒)	発生車両数	12437	12437
	d2通過車両数	12433	12436
	平均旅行時間(秒)	30.61	26.44
	平均遅延時間(秒)	10.61	6.44
	無減速無停止通過数	5054	8740
	無停止率(%)	40.65	70.29
q=0.05 (台/秒)	発生車両数	31573	31573
	d2通過車両数	31560	31561
	平均旅行時間(秒)	30.95	27.94
	平均遅延時間(秒)	10.95	7.94
	無減速無停止通過数	12023	18480
	無停止率(%)	38.1	58.55
q=0.1 (台/秒)	発生車両数	60194	60194
	d2通過車両数	60172	60173
	平均旅行時間(秒)	31.57	29.13
	平均遅延時間(秒)	11.57	9.13
	無減速無停止通過数	21286	29371
	無停止率(%)	35.38	48.81
q=0.2 (台/秒)	発生車両数	117811	117811
	d2通過車両数	11777	117785
	平均旅行時間(秒)	32.64	30.6
	平均遅延時間(秒)	12.64	10.6
	無減速無停止通過数	33545	42702
	無停止率(%)	28.48	36.25

図6は $q=0.1$ の場合の旅行時間 $ptime$ のヒストグラムを示す。無減速無停止通過

(ptime=20sec)の箇所にピークがあり、他はほぼ一様分布となっている。図7は図6のピーク箇所以外の部分を拡大したもので、従来方式では、ほぼ一様分布であるが、提案方式では、最短赤時間を確保しているため、赤に変わった直後には、本方式の時間制御が行われず、すなわち、長い待ち時間の場合は従来方式と変わらない時間となっている。

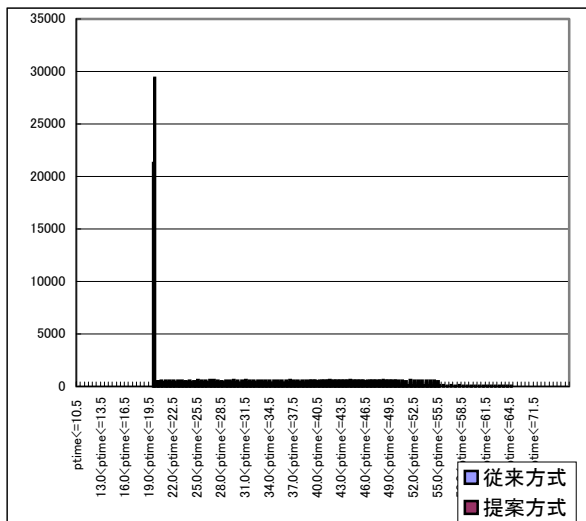


図6 ヒストグラム(q=0.1)

提案方式の遅延時間の改善効果を表2、図8に示す。無停止率の改善効果を表3、図9に示す。

表2 遅延時間の改善効果

q	従来方式(秒)	提案方式(秒)	改善効果(%)
0.02	10.61	6.44	39.30
0.05	10.95	7.94	27.49
0.1	11.57	9.13	21.09
0.2	12.64	10.6	16.14

ただし、改善効果 = (従来方式 - 提案方式) / 従来方式

表3 無停止率の改善効果

q	従来方式(%)	提案方式(%)	改善効果(%)
0.02	40.65	70.29	29.64
0.05	38.10	58.55	20.45
0.1	35.38	48.81	13.43
0.2	28.48	36.25	7.77

ただし、改善効果 = 提案方式 - 従来方式

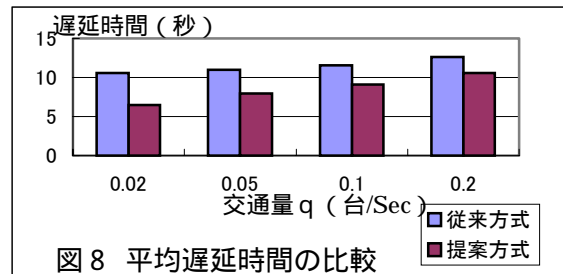


図8 平均遅延時間の比較

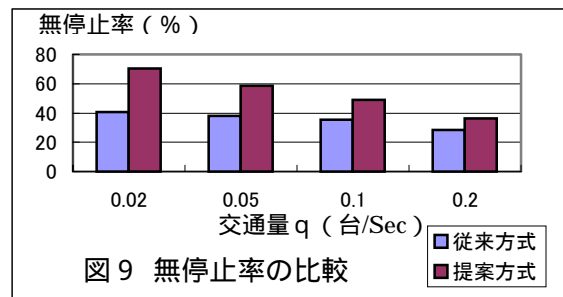


図9 無停止率の比較

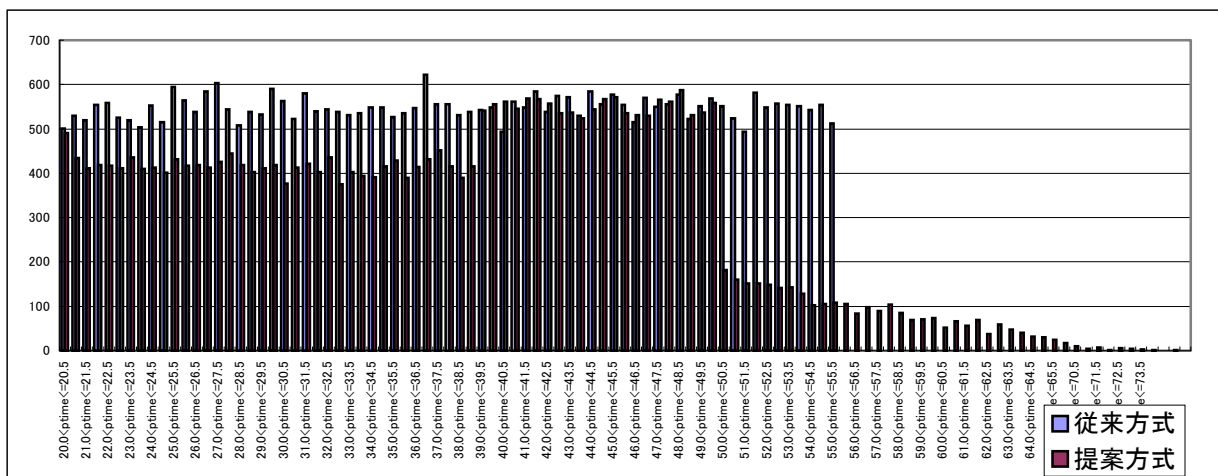


図7 ヒストグラム(q=0.1)の一部拡大

5 . 考察

従来方式において、車両の減速時間、加速時間、車頭距離を無視すれば、平均旅行時間 $E[ptime]$ は概略、次の(3)式で計算できる。

$$E[ptime] = \frac{d2 - d1}{v1} + \frac{atime + rtime}{gtime + atime + rtime} \cdot \frac{atime + rtime}{2} \quad (3)$$

第1項は、無減速、無停止で $d1$ から $d2$ まで速度 $v1$ で走行する時間である。第2項は遅延時間で、停止指示(黄信号と赤信号としている)に遭遇する確率と、遭遇したとき待たされる平均時間の積である。(車両の加速時間、車頭距離を考慮すると、第2項は、飽和交通流に対する待ち行列が発生するので、待ちによる遅延時間が発生する[4],[5]。)

従来方式において、 $ptime$ の分布は、無停止旅行時間(20.0sec)に1つのピークがあり、それ以外は最大旅行時間(20+atime+rtime sec)まで一様分布に従う。減速時間、加速時間を考慮すると、最大旅行時間は若干大きくなる。

提案方式では、 $ptime$ の分布は、制御効果によって、無停止旅行時間の数が増加するので、無停止旅行時間のピークが大きくなる。理想的にはすべての車が無停止で交差点を通過することであるが、クロス方向への影響を抑えるため、最短赤時間、最短青時間を設けているので、そのようにはならない。また、当該車と交差点との間に先行車が存在する場合は、提案方式の信号制御を行わないので、 q の大小によって影響を受ける。 q が小さいと改善効果は大きい。

q が小さくて、クロス方向に車がなくて停止する必要がないのに、赤信号で停止させられるような状況は、本提案では、回避できるが、全体として改善の効果が求められるのは、 q が大きいときであり、この場合に対応できるよ

うな制御方式の検討が必要である。

6 . おわりに

今回は簡略化したシミュレーションによって、我々の提案方式は一定程度の効果があることを示した。今後の検討課題として、

- ・道路の上り方向、下り方向の両方向、交差する上り、下り方向の合計4方向の車両を統合的に扱うこと
- ・4方向を考慮した制御方式の精査
- ・青信号時間を延長(赤信号短縮)した次の表示時に青信号時間を短縮(赤信号延長)する方式を見直すこと
- ・混雑時(q が大)の制御方式の検討
- ・地点制御から系統制御、広域制御への拡張などが考えられる。

謝辞

本研究の文献調査につきまして、オムロン(株)金山憲司博士にご協力いただきましたことを記し、感謝いたします。

参考文献

- [1] ITS 関係五省庁年次レポート(平成12年版), VERTIS
- [2] 織田利彦、「交通信号制御の発展的経緯と今後の展望」、システム/制御/情報、Vol.45, No.5, pp.240-247, (2001)
- [3] 都市街路交通管制システム(ET-UTS)、OMRON TECHNICS、Vol.13、No.3、pp.343-31、(1973)
- [4] F. V. Webster, "Traffic Signal Settings," Road Research Technical Paper No.39 (1958)
- [5] A. L. Miller, "Settings for Fixed-Cycle Traffic Signals," Operational Research Quarterly, Vol.14, No.4, (1963)