

交差点無停止通過型交通管制方式の提案と検討

A Proposal and some Considerations about Nonstop Road Traffic Control

宮西 洋太郎 † 中村 俊一郎 ‡

Yohtarō Miyanishi † Shun-ichiro Nakamura ‡

† 宮城大学 ‡ 日本工業大学

† Miyagi university ‡ Nippon Institute of Technology

キーワード：ITS(Intelligent Transport Systems)，道路交通管制(Road Traffic Control)，無停止通過交差点 (Nonstop Intersection)，路車間通信(Road Vehicle Communications)，車々間通信(Inter Vehicle Communications)

連絡先：〒981-3298 宮城県黒川郡大和町学苑 1 番 宮城大学事業構想学部 デザイン情報学科 宮西洋太郎
TEL：022-377-8352，FAX：022-377-8390，E-mail：miyanisi@myu.ac.jp

1. はじめに

道路交通における信号制御について、1950 年代後半以来、交通流の理論的解析やシミュレーションが多くなされ、各種の制御方式の研究がなされてきた^{[1][2][3][4]}。歴史的には 1 つの交差点の信号制御である地点制御から始まり、1 つの路線の信号群を制御する系統制御、さらには面的に広がった信号群を制御する広域制御と発展を遂げ、海外あるいは国内の多くの都道府県、都市で実用化されている^{[5][6]}。

従来の制御方式の前提は、概して交通の流れを統計的情報として全体的に把握するという前提であった。

一方近年、ITS 関連技術の研究が活発に行われ、GPS を用いた高精度な車両測位技術、電波ビーコン、光ビーコンおよび ETC に見られる路車間通信技術が実用化され、さらには車々間通信技術が研究されており、道路交通における車両に関する各種情報を統計的な全体情報ではなく、個々の車両の状態情報をきめ細かく活用できる基盤が整いつつある。

本研究は、究極的に、管制領域内の全車両の状態情報（位置、速度、加速度、意図する方向、車両特性、など）が各車両において把握され、それらを路車間通信によって道路管制側で把握でき、管制側は道路面のスループット（全体の交通容量）あるいはレスポンスタイム（走行時間、旅行時間）の観点から各車両に適切な指令を行い、運転者はそれに従って運転を行う（将来的には自動制御されることもありうる）という前提にたつ。そのような前提では、従来の交通信号制御方式よりも効率の良い道路交通システムが達成できるのではないかという想定に基づく研究である。

この考えで筆者らは、1 つの交差点に関して、交差点に x（東西）方向、および y（南北）方向から進入する先頭車両の個別のリアルタイム情報を用いて、それに応答する形で信号現示のタイミングを制御する信

号制御方式の提案を行った。そしてシミュレーションによって、その効果を調べ、当該提案の方式は一定の効果が得られることが判明した^[7]。

今回は、面的に広がった道路網において、車両走行に信号を応答させるのではなく、従来の系統制御や広域制御の手法で設定された信号現示タイミングに、車両の走行をあわせていくといった管制方式についての提案を行う。航空管制に類似した考えで、車両の走行を制御するので、管制と呼ぶことにする。将来的には、前者の交通状態に対応させて信号を制御する方式と今回の信号に対応させ交通を管制する方式の統合も狙っている。

1 つの交差点で通行可能な交通量は、飽和交通流率として定義されており、青 1 時間あたり 2000 台程度とされている^[5]。しかし、交差点で車両が赤信号で一旦停止し、青信号で発信する場合、停止した車両が加速するのに要する時間（発進損失）が必要である点、および停止後発進する交差点内は一種の渋滞状態であり、車頭距離も速度の割には大きくなる点^[5]を考慮すると、車両が交差点を無停止で通過できるほうが当該交差点での車両の通過数を多くすることができると考えられる。すなわち、交差点を通過する速度が交差点以外の場所における速度、すなわち道路の設計速度のまま走行できるほうが、交差点通行可能交通量は大きいと考えられる。面的な道路交通において交差点での車両通過数が領域全体の交通流のボトルネックになっていると考えられるので、交差点での車両通過数を高めることは意義が大きいと考えられる。

そこで、各交差点で、交差点の手前で減速し、青信号現示のタイミングに同期するように加速し、交差点を無停止、望ましくは道路設計速度で通過できるような管制を行えば、道路交通面領域全体として、扱える車両数（スループット）が大きくなると考えられる。本研究では、このように交差点を無停止で通過できる

管制方法を提案する。

本方式の有効性の評価には、シミュレーション実験による評価が必要であるが、まだ実験結果が得られていない。今回は、管制方式の提案と理論的な検討を述べる。本方式が有効に機能する場合は、交差点間の距離がある程度離れている場合であり、交差点間の距離が短い場合には、どのように減速しても1つ先の交差点の赤信号現示中のタイミングに交差点に到着してしまうので、設計速度での交差点通過という目標は達成できず、交差点での停止または設計速度より低い速度での無停止通過とならざるをえない。このような点について、無停止通過の条件を明らかにする。

2. 問題の定義

この節では、本稿で取扱う問題を明確にする。ある地域で道路交通信号が系統制御または広域制御されているものとする。図1にその一部、隣接する交差点とその間のリンク（道路区間）を示す。

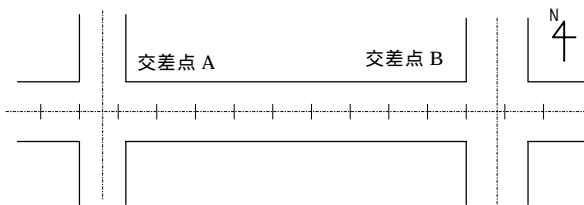


図1 系統・広域制御された2つの交差点

図1において、交差点A、Bでは、東西方向（東、西、西、東の合計）と南北方向（南、北、北、南の合計）の交通量が同程度であるとし、青現示時間は東西、南北ともに同等とする。

図2に、交差点A、Bにおいて、西・東の交通よりも、東・西の交通が優先されている場合の走行軌跡の例を示す。図2において、交差点Bを通過した東・西（図では上から下へ）の車両は交差点Aで停止することなく通過する。一方、交差点Aを通過した西・東（図では下から上へ）の車両は、交差点Bでの赤信号により交差点前で停止し、青信号になるまで待たされる（この図で交差点Bでは、下から上への通行は黄信号時間の半分まで通過するとし、交差点Aでは、黄信号で停止するものとしている）。

図2は西・東の方向の交通流が無く、東・西の方向の交通流のみ存在する場合には、適合したオフセットである。しかし、両方向に同程度の交通流がある場合には、両方向とも平等な通行になるように、オフセットが設定される。その場合には、両方向で信号待ちが生じる。本提案は、車両の速度制御（管制システムからの指令速度に手動制御、または将来的には自動制御）を行うことにより、図2における信号待ちを無くすることを目的とする。その例を図3に示す。

図3において、各車両は、交差点間での道路で、指令された速度に減速し、一定速度で走行した後、指令された速度に加速し、次の交差点を無停止で通過する（この図では黄信号で停止するものとしている）。

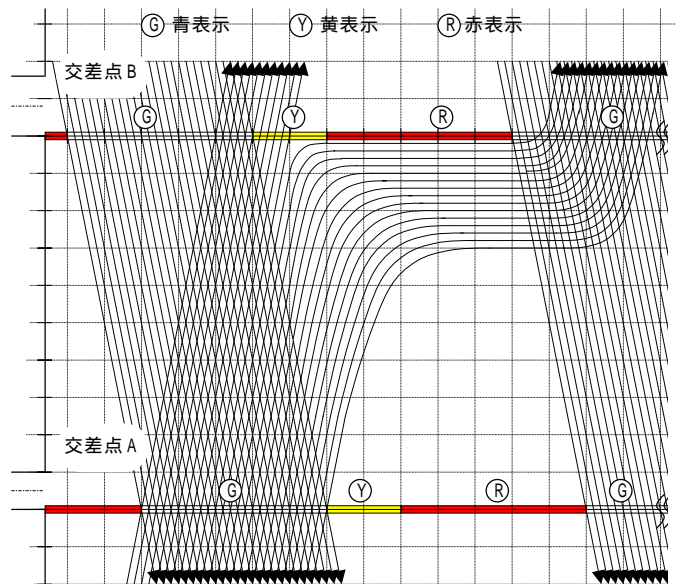


図2 2つの交差点間での走行軌跡図（車両の流れ）
x軸：時間，y軸：位置

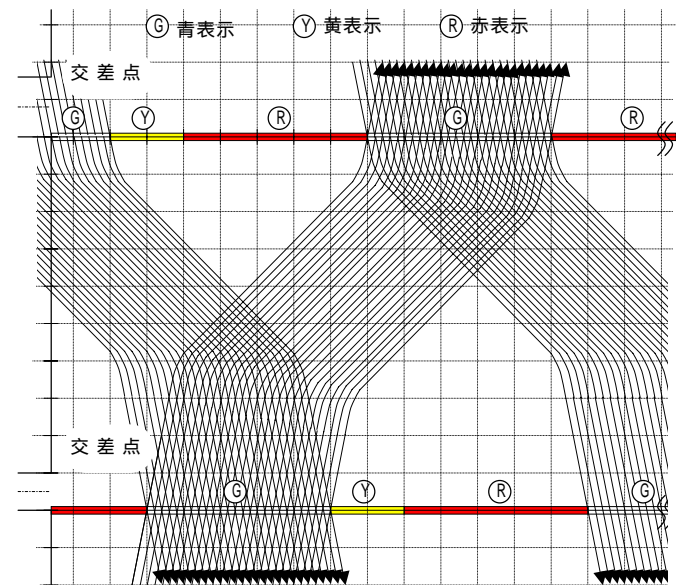


図3 2つの交差点間での無停止走行軌跡図（車両の流れ）
x軸：時間，y軸：位置

一般に、平面交差道路において、交差点が道路の交通容量を大きく低下させる要因となっている。すなわち、交差点が無い場合に比べ、

$$\frac{\text{青現示時間} - \text{発進損失時間}}{\text{青現示時間} + \text{黄時間} + \text{赤時間}}$$

倍に減少する。そこで交差点の存在の影響を小さくするために、青現示時間の間にできるだけ多くの車を通過させることを考える。

図2と図3を比較して、交差点を通常の方法で通過するほうが、当該交差点でのスループットが大きいこ

とがわかる．その理由は，発進損失時間，すなわち停止から通常速度まで加速するのに要する時間（加速損失），および直角方向の交通との安全性の確保（クリアランス損失）のためである^[5]．

図2, 3では直角方向の交通との関連は表現していないのでクリアランス損失は表現できていないが，発進損失によるスループットの低下を読み取ることができる．なお，スループットは速度 v に比例し，車頭距離 s に反比例する．

図4に速度と車頭距離の関係の例を示す．図において速度と車頭距離の関係は自由流部分と渋滞流部分の2つに分かれる．まず点線で囲った部分の自由流と渋滞流との比較において，同一車頭距離に対して自由流のほうが，速度が大きく，スループットが大きいことが分かる．次に渋滞流のなかで比較すると，この曲線自体は下に凸になっており，速度が大きいほうが車頭距離が正比例以上に大きくなる性質をもつが，速度がゼロでも車頭距離が有限の値，すなわち切片をもっているので，例えば，22km/h付近と42km/h付近を比較して直線が直線を下回っており，42km/hのほうがスループットが大きいことがわかる．

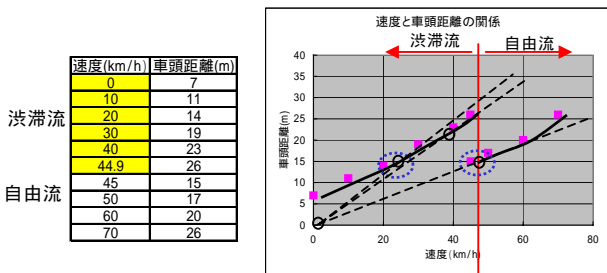


図4 速度と車頭距離の関係
(参考文献[5]から作図)

すなわち，発進損失を小さくするために，交差点を無停止で通過させ，そして通過速度を低速ではなく，通常の走行速度で通過させる（高速で通過させる）という方式が望ましい．

3. 制御速度の計算方法

この節では，管制システムから各車両に指令する速度，加速度の計算方法について述べる．

各車両は同一仕様・性能と仮定し，走行時の偏差（ばらつき）も無いものとする．各車両は，管制システムからの指令に従い，一定速度，減速，一定速度，加速，一定速度の順序で速度を制御する．車両は，通常の走行時には，当該道路区間に定められた制限速度で定まる一定速度で走行するものとする．このときの速度を「高定速度」と称することにする．減速の後の一定速度を「低定速度」と称することにする．

以下に各車両における変数の定義を行う．

- ・制御開始時の高定速度 v_0 [m/sec]，
- ・制御終了時の高定速度 v_1 [m/sec]，($v_1=v_0$ とする)，
- ・制御開始時間 t_{00} [sec] = 0, 制御開始位置 x_{00} [m] = 0
- ・制御終了時間 t_{11} [sec]，制御終了位置 x_{11} [m]，

- ・減速開始時間 t_0 [sec]，
- ・加速終了時間 t_1 [sec]，
- ・低定速度走行時間 $2c$ [sec] (減速区間と加速区間は走行軌跡が点対称とみなし， c の2倍という意味)

これらを独立変数として与えて，次の従属変数を計算する．

- ・減速後の低定速度 v_m [m/sec]，
- ・減速開始位置 x_0 [m]，加速終了位置 x_1 [m]，
- ・加速時間 d [sec] = 減速時間，
- ・加速度 [m/sec²] = 減速度 (= - とする)，
- ・減速終了時間 t_m [sec]，減速終了位置 x_m [m]，
- ・加速開始時間 t_n [sec]，加速開始位置 x_n [m]，

$$x_0 = x_{00} + v_0(t_0 - t_{00}) \quad (1)$$

$$x_1 = x_{11} - v_1(t_{11} - t_1) \quad (2)$$

$$d = (t_1 - t_0) / 2 - c \quad (3)$$

$$\alpha = (x_0 - x_1 + 2v_0c + 2v_0d) / (d^2 + 2cd) \quad (4)$$

$$\beta = -\alpha \quad (5)$$

$$v_m = v_0 - \alpha d \quad (6)$$

$$t_m = (t_0 + t_1) / 2 - c \quad (7)$$

$$t_n = (t_0 + t_1) / 2 + c \quad (8)$$

$$x_m = x_0 + v_0(t_m - t_0) + (1/2)\beta(t_m - t_0)^2 \quad (9)$$

$$x_n = x_m + v_m(t_n - t_m) \quad (10)$$

図5にこれらの式の導出について述べる．低定速度 v_m で時間 c を走行した後に，加速度で加速を開始して高定速度 v_1 ($= v_0$)に至る部分を拡大している．(点対称となっている片方のみを表す．)

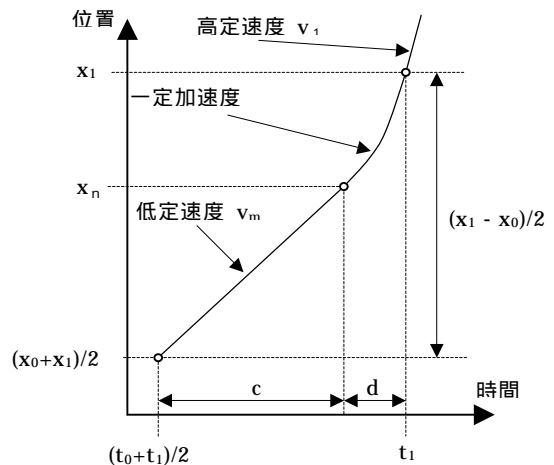


図5 低速度 加速 高定速度にいたる区間

図5において、位置に関する方程式(13)、速度に関する方程式(12)の連立方程式を解くことにより、加速度、低定速度 v_m を求めることができる。

位置に関する方程式

$$v_m(c+d) + (1/2)\alpha d^2 = (x_1 - x_0)/2 \quad (11)$$

速度に関する方程式

$$v_m + \alpha d = v_1 \quad (12)$$

4. 制御速度の計算例

この節では、いくつかの計算例を示し、無停止通過制御が不可能な場合があることを示す。

(1) ケース1 (意図通りの制御)

表1にこのケースのパラメータを示す。このパラメータでの走行軌跡を図6に示す。このケースは提案の意図通り、高定速度、減速、低定速度、加速、高低速度の制御ができるケースである。

表1 ケース1のパラメータは計算値

t00 [sec]	0	開始時間	t11 [sec]	70	終了時間
x00 [m]	0	開始位置	x11 [m]	420	終了位置
t0 [sec]	5	減速開始時間	t1 [sec]	65	加速終了時間
x0 [m]	50	減速開始位置	x1 [m]	370	加速終了位置
v0 [m/sec]	10	初期速度	v1 [m/sec]	10	終了速度
2c [sec]	20	減速後定速運転時間			
d [sec]	20	加速時間、減速時間			
[m/sec^2]	0.35	加速度	[m/sec^2]	-0.35	減速度
tm [sec]	25	減速終了時間	xm	180	減速終了位置
tn [sec]	45	減速後定速終了時間	xn	240	減速後定速終了位置
vm			vm	3	減速後速度
q = /9.8	0.04	q値	*d	7	減速度

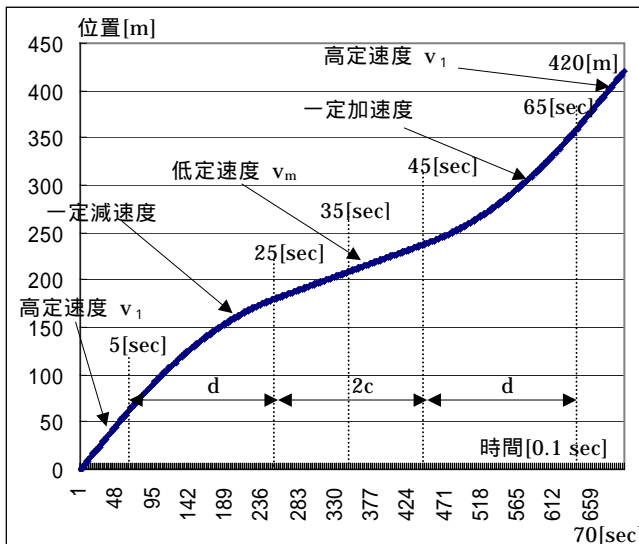


図6 ケース1の走行軌跡

(2) ケース2 (瞬間停止の制御)

表2にこのケースのパラメータを示す。このパラメータでの走行軌跡を図7に示す。このケースは、減速を続けていき、やがて速度が0になり、その後から

加速を続けていき、高定速度にいたるケースで、低定速度 ($v_m = 0$) で走行する時間が0であるような臨界的なケースである。

このケースよりも ($x_1 - x_0$) が短くなったり、 v_1 が大きくなると、無停止通過ができなくなる。

交差点間で無停止で走行できる条件は、 $v_1 = v_0$, $=$ - という条件で (11), (12) を $v_m > 0$ となる不等式を解き、

$$x_1 - x_0 > \frac{v_1^2}{\alpha} \quad (13)$$

となる。これは無停止で走行できる場合の交差点間の距離 ($x_1 - x_0$) と進入、退出速度 v_1 、加速度との関係を示す。すなわち、交差点間距離 ($x_1 - x_0$) は、退出速度 v_1 、加速度で定まる値より大きくなければならない、一方交差点距離、加速度が決まれば、速度 v_1 はある値より小さくなければならない。

表2 ケース2のパラメータは計算値

t00 [sec]	0	開始時間	t11 [sec]	50	終了時間
x00 [m]	0	開始位置	x11 [m]	300	終了位置
t0 [sec]	5	減速開始時間	t1 [sec]	45	加速終了時間
x0 [m]	50	減速開始位置	x1 [m]	250	加速終了位置
v0 [m/sec]	10	初期速度	v1 [m/sec]	10	終了速度
2c [sec]	0	減速後定速運転時間			
d [sec]	20	加速時間、減速時間			
[m/sec^2]	0.5	加速度	[m/sec^2]	-0.5	減速度
tm [sec]	25	減速終了時間	xm	150	減速終了位置
tn [sec]	25	減速後定速終了時間	xn	150	減速後定速終了位置
vm	0	減速後速度			
q = /9.8	0.05	q値	*d	10	減速度

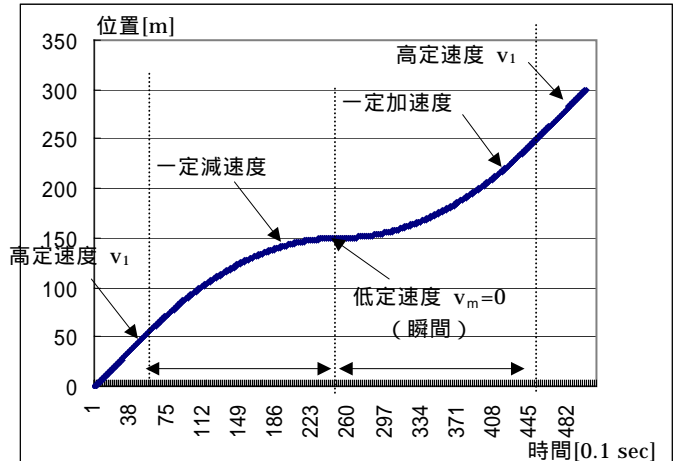


図7 ケース2の走行軌跡

(3) ケース3 (停止時間が存在する制御)

表3にこのケースのパラメータを示す。このパラメータでの走行軌跡を図8に示す。このケースは、減速を続けていき、やがて速度が0になり、しばらく停止して、それから加速を続けていき、高定速度にいたるケースで、低定速度 ($v_m = 0$) で停止する時間が0でないケースである。

表3 ケース3のパラメータ は計算値

t00 [sec]	0	開始時間	t11 [sec]	50	終了時間
x00 [m]	0	開始位置	x11 [m]	200	終了位置
t0 [sec]	5	減速開始時間	t1 [sec]	45	加速終了時間
x0 [m]	50	減速開始位置	x1 [m]	150	加速終了位置
v0 [m/sec]	10	初期速度	v1 [m/sec]	10	終了速度
2c [sec]	20	減速後定速運転時間			
d [sec]	10	加速時間、減速時間			
[m/sec^2]	1	加速度	[m/sec^2]	-1	減速度
tm [sec]	15	減速終了時間	xm	100	減速終了位置
tn [sec]	35	減速後定速終了時間	xn	100	減速後定速終了位置
			vm	0	減速後速度
g= /9.8	0.1	g値	*d	10	減速度量

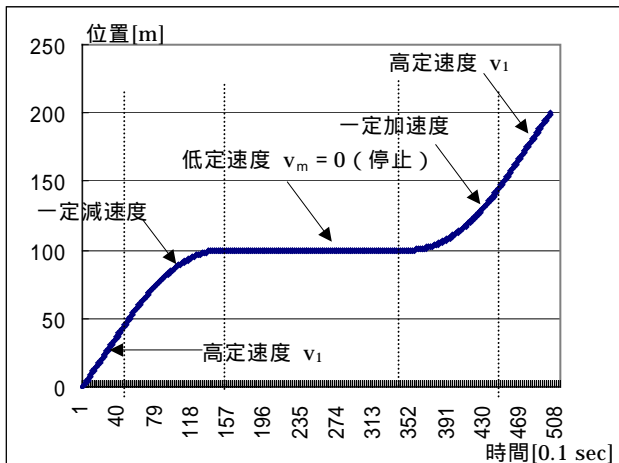


図8 ケース3の走行軌跡

(4) ケース4 (逆行する場合)

表4にこのケースのパラメータを示す。このケースはケース2とほとんど同じパラメータであるが、ケース2では、 $v_0 = 10$ [m/sec]に対して、ケース4では $v_0 = 15$ [m/sec]と大きくしている。

このパラメータによる走行軌跡を図9に示す。この図に現れているように、方程式を単純に解くと、 v_m が負となる領域が現れる。すなわち、一度逆行してから加速するという非現実的な走行軌跡となる。実際には、このような場合、無停止走行は不可能となり、通常のように交差点で信号待ちを行うか、または v_0 を小さくする。道路面のスループットの面からは、 v_0 を小さくして、無停止通過とするほうが、前述の理由でスループットを大きくできるであろう。

表4 ケース4のパラメータ は計算値

t00 [sec]	0	開始時間	t11 [sec]	50	終了時間
x00 [m]	0	開始位置	x11 [m]	300	終了位置
t0 [sec]	5	減速開始時間	t1 [sec]	45	加速終了時間
x0 [m]	75	減速開始位置	x1 [m]	225	加速終了位置
v0 [m/sec]	15	初期速度	v1 [m/sec]	15	終了速度
2c [sec]	0	減速後定速運転時間			
d [sec]	20	加速時間、減速時間			
[m/sec^2]	1.13	加速度	[m/sec^2]	-1.13	減速度
tm [sec]	25	減速終了時間	xm	150	減速終了位置
tn [sec]	25	減速後定速終了時間	xn	150	減速後定速終了位置
			vm	-7.5	減速後速度
g= /9.8	0.11	g値	*d	22.5	減速度量

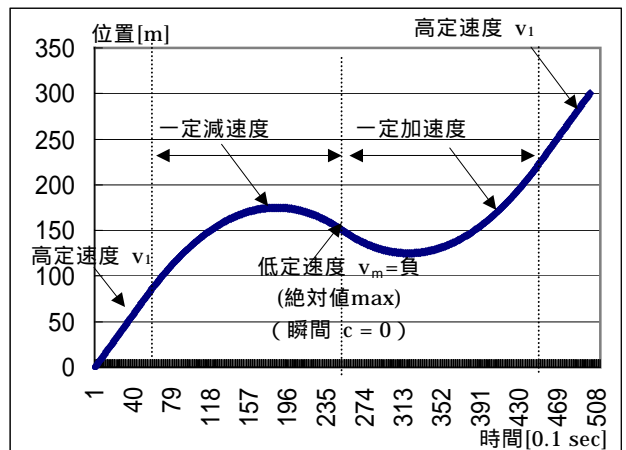


図9 ケース4の走行軌跡

5. 考察

前節で概観したように、本提案が効果を発揮できるためには、交差点間の距離および走行速度の2つの要素が大きく影響する。したがって100m程度の短い交差点間隔が面的に広がる市街地においては、すべての交差点を同等に扱うのではなく、主要な交通流の存在する交差点を中心とした管制方式が必要となってくるであろう。

また、道路面のスループットは確かに向上するであろうが、ケース3のように交差点間の道路上に停止したり、極端に低速になったりするという不自然さに一般の運転者がなじむかという問題もあろう。またそのときの後続車両の待ち行列が占有する道路区間の問題もある。

本方式について、情報処理学会シンポジウムDICOMO2005にて研究発表を行ったが^[8]、発表後評価委員から貴重なコメントをいただいた。4分の3は批判的コメントであったが、これらのコメントの主旨を以下に記し、それに対する筆者の現時点の考えを「」以降にまとめる。

今回の研究会では、制御システムの観点から改めてご批判を仰ぎたい。

(1) 想定している状況が現実的でない - 1

「適用できる現実的な状況を想定してモデル化した方がよい。特に人間の要素を考慮した柔軟性がITSに求められる。」

本研究の現段階では、提案が原理的に有効か否かを検討している段階であり、将来的には、右折、左折の影響、速度のばらつきの影響、車頭距離のばらつきの影響、人的要素の影響、各種パラメータの感度分析などご指摘の点についても検討していきたい。

(2) 想定している状況が現実的でない - 2

「実用性の面で前提が現実的ではない。全ての自動車が自動運転と想定するか、ACC(Adaptive Cruise Control)などの自動車インテリジェント機能を想定した方がよい」

指摘(1)と同様であるが、自動車の全自動運転とい

う方向は将来的にありうるが、本研究は、航空管制システムのように、地上からの管制をうけて、操縦者が自律的に航空機を操縦すること、すなわち半自動の考えをモデルとしている。現在の自動車交通が全自動に以降する前に、あるいは全自動に以降しても部分的に半自動の段階がありうると考えている。そして、その場合、確かに指摘(1)のように人間的要因、例えば管制指示を受けるヒューマンインタフェース、管制指示からの時間遅れや不服従など、も考慮していくことが必要であろう。

(3) 想定している状況が現実的でない - 3

「提案方法は、自動車専用道の環境で有効な技術と考えられる。応用場面との整合性に問題があるのではないか」

指摘(1)、(2)とほぼ同様な主旨であるが、自動車専用道すなわち基本的に交通信号のない高速道路と交通信号のある市街地の相違点を指摘されている。今回の研究は、交通信号に同期させて交通流を制御するという考えの提案であり、整合性というより、提案する方式が市街地交通に有効か否かを研究することが目的である。

(4) シミュレーションの必要性

「新しいアイデアなのでシミュレーションによる評価の充実を期待したい。」

4件のうち唯一の肯定的コメントであった。今回はまだ原理的な検討のみであり、今後シミュレーションによって研究の充実をはかっていきたい。

全体的に、本研究が現実的でないというご批判が多かったが、筆者は必ずしも、そのように捉えていないし、研究の価値があると考えている。

否定的な意見が多いということは、本研究のような考えが他に存在しないということ、すなわちオリジナリティ（ユニーク性）の傍証であるとも考えられる。しかし現実的でないというご指摘をさらにブレークダウンし要因を分析し、それぞれに検討を加え、反論していくことが必要であろう。それができないならば、確かに現実的でないということになり、研究の価値はないものとする。

6. おわりに

日常、車で市街地を走行するとき、次の交通信号がどのようなタイミングで青信号現示されるのかを知りたい場合がある。それが分かれば、そのタイミングに同期させて、効率的な走行が可能であろう。特に北国の冬季運転者は勘に基づき日頃実践していることでもある。このような要望に対し、車々間通信、路車間通信など ITS 技術の進歩によって、個別の車両状態情報などの情報が利用可能となり、管制システムとして実現する可能性がでてきた。本稿では、信号現示タイミング自体は、全体の交通量から最適または準最適に設定されているものとし、その信号現示タイミングに同期させて、車両に対して速度指令の制御情報を送信し、車両はその制御情報に従って運転を行う管制システム

を提案した。今回は、シミュレーション実験結果による評価はまだ得られていないが、方式の原理とその若干の検討について述べた。多くは今後の検討課題である。

本提案は、机上検討により一定の効果が期待できることが明らかになったが、今後の課題として、

- ・ 交差点の交通量による区別
 - ・ 境界の検討（市街地を無停止管制しているとして、そこに流入する交通に待ちが生じる）
 - ・ 個別のばらつきの影響
 - ・ 速度、加速度の指令方法
 - ・ 指令速度に対する応答特性の検討
 - ・ 後続車両へ影響と後続車両の速度制御
 - ・ 左折、右折の分析
 - ・ シミュレーション
- などが課題である。

参考文献

- [1] F. V. Webster, "Traffic Signal Settings," Road Research Technical Paper No.39, 1958
- [2] Alan J. Miller, "Settings for Fixed-Cycle Traffic Signals," Operational Research Quarterly, Vol.14, No.4, pp.373-387, 1963
- [3] 定方希夫, 「電子計算機による信号交差点の解析」, 経営科学, 第7巻第2号, pp.87-99, 1963
- [4] 「都市街路交通管制システム(ET-UTS)」, OMRON TECHNICS, Vol.13, No.3, pp.342-361, 1973
- [5] 越 正毅, 「交通工学通論」, 技術書院, 1989
- [6] 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
- [7] 宮西, 前川, 宮本, 「ITS 技術を利用した交差点信号制御の提案」, 情報処理学会第6回 ITS 研究会, pp.53-60, 2001
- [8] 宮西, 中村, 「ITS 技術を利用した交差点交差点無停止通過型交通管制方式の提案」, 情報処理学会 DICO2005, IPSJ Symposium Series Vol.2005, No.6 pp.49-51, 2005