

運転者特性を考慮した信号交差点のクリアランス 制御モデルに関する研究

山田 稔*・森 康男**・鈴木 徹***

オンライン制御による信号のクリアランス設定の最適化が実用化されているが、一層の効果を挙げるには運転者の行動特性を明確に把握することが重要と考えられる。本研究においては先行車との関連を考慮することにより従来よりの確に運転者挙動を予測できることを実測調査を用いて明らかにした。さらに、これを取り入れたクリアランス制御を提案するとともに、シミュレーションによりこの制御方法の特質を明らかにした。

Key Words : inter-green, drivers' behavior, traffic simulation

1. 序

(1) クリアランス最適制御と運転者特性の考慮の必要性

交差点の信号現示の設定に際し、黄や全赤、いわゆるクリアランス時間は交差点の処理能力決定の重要な要素である。クリアランスによる損失を節約すればサイクル長が短縮され通過交通の遅れの減少に寄与する。しかし同時に、停止するために急減速を行ったことに起因する追突事故や、交差点内に残留する車と次の現示で発進する車や横断歩行者との衝突事故への影響を考慮して十分なクリアランス時間を確保することが重要である。

そこで、クリアランス時間の最適値を探そうとする研究が行われてきた。信号が青から黄に変わったときに通過するか停止するかという運転者の判断は法規に基づいた一定のルールに従うという仮定のもとで交差点形状や平均的な走行速度等から黄・全赤時間の最適値を設定しようとする考え方は、Williams¹⁾によれば既に1929年に発表されていると述べられている。しかし、この判断特性の仮定は必ずしも現実を反映するわけではなく、これで解決できない問題点が指摘されてきた。例えば、Mahalelら²⁾は事故データから、クリアランス時間が長い場合には減速度・残留の両面で安全な設定になっている。相前後する車両が停止か通過かの判断で矛盾する可能性が強く危険性の高いことを指摘している。

近年、速度検出データを用いてオンライン制御を行うことにより、サイクルごとに黄・全赤時間および黄開始時刻を最適化する方法が実用化されるようになった。これは、交差点接近時の個々の車両の状況を観測し、それ

が予め設定した条件に該当すれば安全に通過できるようなクリアランスを確保し、そうでなければ損失時間を小さく押さえることにより、安全性と円滑性をともに向上させようとするものである。しかし、対象を識別する際に、運転者がとるであろう通過・停止の判断を的確に予測できなければ、やはり解決されない問題が残る。Baguley³⁾は、イギリスでこのような制御がなされている交差点における行動調査の結果より、赤に変わったあとでも交差点に進入する車が相当数見られ、交差点接近時の情報からはこれが通過させるべき車と識別されないために交差点内残留の問題があり、運転者の判断を把握することの重要性を指摘している。

このようなクリアランス制御は、わが国においてもすでに実用化され、事例が報告されている⁴⁾。しかしここでも予め設定したジレンマゾーンに捕まる車両を減少する効果や追突事故の減少が報告されているものの、Baguleyが指摘したような赤での交差点進入やそれに伴う交差点残留の問題に関する評価は明確になっていない。

結局、運転者の停止判断特性は交通管理者が期待するほどには単純で合理性のあるものではないため、望ましいクリアランスの設定方法を考える場合には、運転者が行っている停止判断の実態を把握することが不可欠であるといえよう。さらに、それが明らかにされたなら、それをクリアランスの設定にどのようにして利用すべきなのか、またそれが交差点の円滑性にどのような影響を及ぼすのかについても、これまでに明確にはなっていない。

(2) 運転者の停止判断特性に関する既往の研究

May⁵⁾は、信号が青から黄に変わったときの各車両の停止線からの距離と速度を2次元平面上にプロットし、その平面上の位置とその車の実際の停止通過の別によって、安全性評価を行うことを提案した。そして、各種対策の有無の状況下での観測データの比較でその効果を評

* 正会員 工博 大阪大学助手 工学部土木工学科
(〒565 大阪府吹田市山田丘 2-1)

** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 阪神高速道路公団神戸建設部

Table 1 Statistics of Field Survey

Site No.	Traffic Volume (Veh/hour/lane)	Amber (sec)	All Red (m)	Lane Width (m)	Length of Conflict Area (m)	N of Samples			Average Speed (m/sec)
						Acceptance	Rejection	Total	
1	947	3	3	3.4	17.9	59	26	85	14.9
2	820	3	0	2.5	27.5	122	62	184	8.8
3	812	3	4	2.9	13.5	97	17	114	14.2
4	777	3	3	3.5	15.8	94	46	140	13.9
5	752	4	2	2.9	37.3	128	54	182	13.9
6	734	3	3	3.2	13.4	62	36	98	9.9
7	700	3	0	3.0	32.8	51	46	97	9.1
8	601	3	0	2.7	43.5	31	34	65	10.8
9	572	3	4	3.2	23.4	62	29	91	11.8
10	542	4	3	3.6	14.0	41	31	72	11.8
11	539	4	0	2.8	36.0	62	31	93	13.5
12	539	4	0	2.7	17.8	21	5	26	14.8
13	529	3	4	2.9	53.0	46	35	81	9.3
14	497	3	7	3.0	78.1	25	5	30	16.1
15	476	3	3	3.3	102.8	92	22	114	13.5
16	448	3	5	3.4	44.0	73	43	116	13.9
17	439	3	4	3.0	12.6	73	40	113	5.8
18	424	3	0	2.8	18.9	42	26	68	14.6
19	409	3	4	3.3	27.8	47	13	60	13.3
20	383	3	0	3.1	39.0	46	24	70	10.8

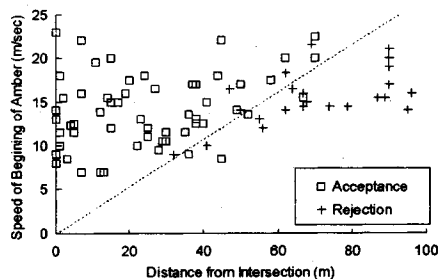


Fig.1 Speed and Distance of Beginning of Amber

併した。Williams¹⁾ はやはり信号が青から黄に変わったときの各車の停止線からの距離や速度に加え、この両者から求められる各種指標の値と実際の停止確率との関係を明らかにしており、クリアランス時間の設定に用いるパラメータにこういった観測情報を用いることを提唱している。さらに、Lin⁶⁾ は観測データより残留の危険性を抑えるために必要な黄+全赤時間の長さについてモデル化を行っている。また、大蔵⁷⁾ も観測に基づき停止確率と各種指標の関連、特に交差点環境の指標との関連を明らかにした。

(3) 本研究の目的

本研究では、まず、実測調査を行って運転者の停止判断特性のモデル化を行うこととした。このモデルは信号を黄に変えた場合に停止するか通過するかを予測判別するものとし、説明変数に従来から用いられてきた車両の速度と停止線からの距離を用いたものと、さらに先行車の要因を加えたものの2種類を用いることとした。そして、それらのモデルの精度を評価・比較することとした。

次に、停止判断モデルから得られる各車の通過・停止の予測情報を活用して、サイクルごとに安全性及び円滑性の各種指標を最適にするような黄開始時刻・黄時間・全赤時間を設定する方法を提案することとした。

最後に、実測の車両到着状況を用いたシミュレーションを実施し、この方法でクリアランス制御を行うことの効果を実験的にし、実用性を評価することとした。

2. 実測調査の概要

(1) 調査の目的

信号が黄に変わった瞬間の各車のおかれた状況と、その車の運転者が行う停止するか通過するか判断との関連を明らかにするために調査を行った。

運転者は信号が黄に変わった後いずれかの瞬間に停止通過の判断を行うと考えられるが、本調査ではその判断結果を行動結果から明らかにする。判断と行動が異なる

ケースとして、通過と判断したものの先行車が停止したためにやむを得ず停止するという場合がある。しかしそれ以外では判断結果と最終の行動が異なることはないと考えられる。そこで、判断と行動が一致する、通過車両および各車線で最初に停止した車両を調査の対象とした。

(2) 調査対象交差点

大阪府下および兵庫県下の幹線道路の3~4枝交差点において、右左折車の混入が少なく前後の交差点の影響を受けにくいことを条件に、Table 1に示す各種交差点属性に差異のある20個所を選び、それぞれについて主道路のうちの一つの流入方向の交通について調査した。

(3) 調査方法

調査は、天候が晴れまたは曇りの日の路面乾燥状態で、午後のある程度交通量が多くかつ渋滞していない状態で行った。8ミリカメラを用い、対象交通の停止線から上流側約100~120mまでの範囲を、信号が黄に変わる少し前から各車線で最初に車両が停止するまで撮影した。そして、各車の信号が黄に変わった瞬間の停止線からの距離およびその前後各1秒間の移動距離より接近速度を求めた。また実際の行動の通過・停止も記録した。

(4) 調査結果の概要

対象とした車両の台数はTable 1に示したように各交差点で26~184台、平均95台となった。

3. 停止判断に影響する信号変化時の要因

(1) ポテンシャルタイムと停止判断の関連

速度・停止線からの距離と、通過・停止の判断の関連を示したのがFig.1である。これは事例として一つの交差点だけのデータをプロットしてある。これを見ると、速度が高いほど、また停止線からの距離が小さいほど通過しようとする傾向が明確である。Williams¹⁾ は、この関連について各種の説明モデルを提案しているが、この節ではその内の次式で表されるポテンシャルタイムの値で分類し停止車両の割合を求めた。

$$P=L/V \dots \dots \dots (1)$$

ただし、P:ポテンシャルタイム(秒)

L:信号が青から黄に変わった瞬間の停止線

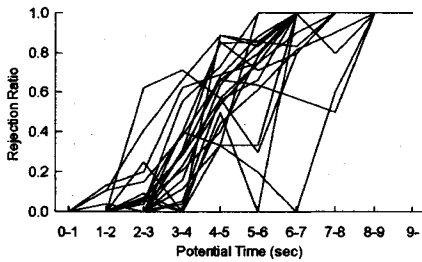


Fig.2 Rejection Ratio and Potential Time

までの距離 (m)

V : 信号が青から黄に変わった瞬間の速度 (m/秒)

交差点ごとに求めた結果を Fig.2 に示す。これを見ると、交差点による差異はみられるものの、ポテンシャルタイムが2~8秒の範囲であれば停止と通過が混在するが、その外側では、確実に停止か通過かが分離されていることがわかる。また、交差点ごとに考えれば混在領域はより小さい範囲で収まっていることがわかる。Williams¹⁾は観測事例より約3秒で停止と通過に分離できる傾向を示したが、今回の結果より、その境界値は交差点で異なることがわかる。

なお、各交差点で停止率が50%になるポテンシャルタイムとその交差点の黄時間・全赤時間との関連を見たのが Fig.3, 4 であるが、いずれも関連があるとは言えない。従って、運転者の判断特性を用いて黄・全赤時間をオンライン制御する場合、その制御が運転者特性へ及ぼすフィードバックを考慮する必要性は小さいと言えよう。

(2) 先行車の存在が停止判断に及ぼす影響

現示変わり目の安全上の問題の一つとして、Mahalelら²⁾の指摘のように相前後する車両の間で停止判断がくい違う危険性が考えられる。この危険性は運転者も十分認識していると思われることから、運転者の停止判断には先行車の状況が少なからず影響を及ぼしていると考えられる。しかし、これまでこれに関してはほとんど考えられていなかった。

Fig.5 は、例として一つの交差点で、先行車の状況別に運転者の停止判断を示したものである。縦軸は前節と同じポテンシャルタイムである。先行車状況として、信号が青から黄に変わった瞬間にすでに先行車が停止線を通過していた(自車が先頭車)場合と、停止線よりも手前にいた(自車が追従車)場合の2つに大きく分類し、さらに後者についてはその時の先行車のポテンシャルタイムを図の横軸にとって示してある。

この図より、先行車が既に停止線を通過している場合には停止通過の判断はポテンシャルタイムの値でかなり明確に分類できることがわかる。

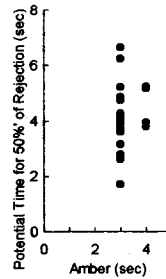


Fig.3 Amber and 50%-Rejection Potential Time

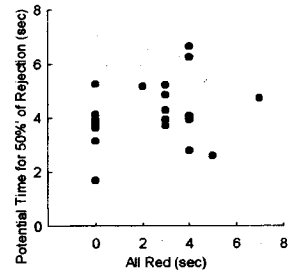


Fig.4 All-Red Length and 50%-Rejection Potential Time

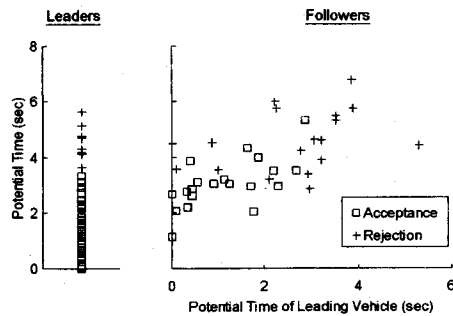


Fig.5 Amber Acceptance across two Potential Time

これに対し先行車が停止線よりも手前にいる場合には同じポテンシャルタイムでも通過するものと停止するものがばらつく傾向が大きいことがわかる。特に、先行車が停止線よりも手前にいて先行車のポテンシャルタイムが3秒以下の場合に、停止・通過の点が重なっており、自車ポテンシャルタイムが3秒程度であっても停止するものや5秒あっても通過するものがある。また、先行車ポテンシャルタイムが0付近の場合に比べ3秒に近づくほど、より大きな自車ポテンシャルタイムでも通過する傾向があり、両者のポテンシャルタイムの差が影響するように思われる。

一方、先行車ポテンシャルタイムが3秒以上の場合は通過するものは、まったく見られない。

なお、これらの結果は Fig.5 に示した交差点だけでなく、それ以外の調査交差点においても概ね同様の傾向を見ることができた。以上の結果より、本研究で先行車が停止判断に及ぼす影響を考慮する場合には、このように先行車の状況によって3つに分類し、それぞれにおける運転者の判断特性を把握することとした。

4. ロジットモデルによる停止判断のモデル化

この章では、前章で述べたような運転者の停止判断の特性を記述する数学的モデルを、観測した全交差点のデータを用いて構築する。

(1) ロジットモデルによる表現

a) 2項ロジットモデル

運転者が現示の変わり目にさしかかった場合、停止するか通過するかの判断を迫られる。この状況では運転者は両選択肢のうち自らの判断基準を用い好ましい方を選択していると考えられる。一方、Mahalelら²⁾の研究などにおいては運転者にとって両方とも好ましくない状態やどちらも好まれる可能性のある状態を識別することが重要と考えられてきた。これら2つの視点からの考察を同時に行うには、運転者にとっての各選択肢の効用を例えば次のように表現することが必要である。

$$U_1 = +x + y + \varepsilon_1$$

$$U_2 = -x + y + \varepsilon_2$$

ただし、 U_1 ：停止することの効用

U_2 ：通過することの効用

x ：両者の差異を表す項

y ：両者の絶対的な大小を表す項

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ：運転者間のばらつき

ここで、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ が独立なガンベル分布に従うと考えることにより、運転者が停止を選ぶ確率は次のよう得られる。

$$R = \frac{e^{x+y}}{e^{x+y} + e^{-x+y}} = \frac{1}{1 + e^{-2x}} \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 R ：停止確率

e ：自然対数の底

よって、観測された停止確率を用いて分析する限りでは、両者の効用の差異は分析できても、両者の絶対的な大小は消去されるため、分析できないことがわかる。そこで以下では、 x を規定する要因を観測データより明らかにすることとした。

モデルの当てはまりの度合いとして、対数尤度を用いることとした。なお、一般に複数の説明変数を用いるモデルにおいて、説明変数を追加した時の対数尤度の変化量を2倍したものは、変数増加が寄与しないという帰無仮説のもとでは漸近的に χ^2 分布に従うことが漸近理論(Asymptotic Method)により導かれており⁸⁾、ロジットモデルでも、変数追加の有意性検定に用いられており⁹⁾、本研究においてもこれをモデルの評価基準として考えることとした。

b) 自転車ポテンシャルタイムモデル (モデル1)

まず、3章(1)節で述べたように自転車ポテンシャルタイム P のみを説明変数とするモデルをつくった。ただし、先に述べたように交差点により通過停止を区分するポテンシャルタイムの値が異なると考えられるため、交差点によって異なる値を取る定数パラメータを含む次のような形を考えた。これをモデル1と呼ぶ。

$$x = aP + b_j \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 a, b_j ：最尤法によって求めるパラメータ

j ：交差点番号

Table 2 Estimated Parameters of Logit Model

Site No.	Model-1		Model-2	
	b_j	r_j	c_j	
1	-2.463	-2.511	-2.936	
2	-4.246	-4.662	-4.157	
3	-3.458	-5.173	-3.409	
4	-2.581	-3.271	-2.817	
5	-3.094	0.900	-3.629	$q =$
6	-1.998	1.099	-2.211	$X_s =$
7	-2.853	-0.010	-3.214	$s =$
8	-2.905	-0.059	-3.311	$t =$
9	-2.188	0.082	-2.817	$u =$
10	-2.507	0.761	-2.566	$v =$
11	-3.381	0.050	-3.703	$w =$
12	-2.807		-2.844	
13	-2.918		-3.165	
14	-3.447		-3.430	
15	-2.824		-3.082	
16	-2.971		-3.510	
17	-2.885		-3.007	
18	-3.137		-3.081	
19	-2.969		-3.047	
20	-2.986		-3.093	

c) 先行車を考慮したモデル (モデル2)

次にモデル2として、先行車による影響を加えたモデルを構築した。3章(2)節で述べたように先行車の状況により3つの場合に分けた。

第1番目は、先行車がすでに停止線を通過している場合である。この場合には自車のポテンシャルタイムによって停止・通過が決まると考え、モデル1と同様の次式で表現した。

$$x = qP + r_j \text{ for } P_i < 0 \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 q, r_j ：最尤法によって求めるパラメータ

P_i ：先行車のポテンシャルタイム

第2の状況は、先行車が停止線よりも手前であってそのポテンシャルタイムが大きく、ほとんどが停止する場合である。このケースでは、後続車の運転者は、先行車が交差点までに距離があるため停止する可能性が高いと予測していると考えられる。そこで、先頭車の場合の停止確率が50%となるようなポテンシャルタイム(= $-r_j/q$)を先に式(4)を用いて求めておき、その値を境界に、先行車ポテンシャルタイムがそれより大きければ自転車も停止すると考えることとした。

さらに、現実にはなんらかの理由からこの状況でも必ず停止する訳ではなく、まれに通過も起こりうる。前節での分析ではそれを規定する要因を見いだすことはできなかったため、ここでは一定の確率で通過が起こると考え、次のような式で表現することとした。

$$x = x_s \text{ for } -r_j/q \leq P_i \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 x_s ：最尤法によって求める定数パラメータ

最後に第3の状況として、先行車が停止線よりも手前にいてそのポテンシャルタイムが小さい場合を考える。この状況では自転車ポテンシャルタイム、先行車ポテンシャルタイムおよびそれらの相互関係が影響すると考えられる。そこで次式の様に両者の2次までの項を考え、さらに交差点ごとに定数項を持つモデルとした。

$$x = sP^2 + tPP_i + uP_i^2 + vP + wP_i + c_j$$

Table 3 Significance of the Models and Their Difference

	Degree of Freedom	Chi-square	Theoretical χ^2 (p=0.005)
Model-1	21	1488.6	41.4
Model-2	47	1549.6	75.6
Difference of Model-1 and 2	26	61.0	48.3

Table 4 Result of Estimated Probability

MODEL-1			
Estimated Rejection Probability	Observed Response		
	Acceptance	Rejection	Total
<10%	245	13	258
10 - 50%	224	143	367
50 - 90%	89	357	446
>90%	15	813	828
Total	573	1326	1899
MODEL-2			
<10%	275	15	290
10 - 50%	215	120	335
50 - 90%	85	323	408
>90%	16	850	866
Total	573	1326	1899

for $0 \leq P_i < -r_i/q$ (6)

ただし、

s, t, u, v, w, c_i : 最尤法により求めるパラメータ

この状況の先行車ポテンシャルタイム P_i の上限には、第2の状況の下限値である $-r_i/q$ を用いることで、式(4)(5)(6)ですべての条件を網羅するよう考慮した。

(2) ロジットモデルあてはめの結果

先述の20交差点の観測データをモデル1およびモデル2に当てはめ、尤度が最大になるように求めた結果のパラメータを Table 2 に示す。

また、ここで以下の3つの検定を行った。まず2つのモデルそれぞれの有意性を個別に調べた。そのための比較対象として、説明変数を持たず停止通過が単に各50%の確率と考える、いわゆるゼロ変数モデルを設定し、これと各モデルとの間に差がないとする帰無仮説に基づく検定を行った。次に、モデル1とモデル2の間の差異についても、差異が無いとする帰無仮説により検定を行った。結果を Table 3 に示す。この表は比較するモデル間の対数尤度の差の2倍の値すなわち χ^2 値の計算値とその自由度および0.5%有意水準での理論 χ^2 値を示しているが、いずれも計算値が理論値を上回っており、有意であることがわかる。モデル1とモデル2との差異が有意という結果となったことから、モデル2のように複雑なモデルにすることは停止判断を記述する上で意味があるといえる。

(3) モデルの予測能力の検証

Table 4 は、観測値に各モデルを適用したときに得られる停止確率の分布を、観測車両の停止・通過別に示したものである。また、Table 5 はモデルから得られた停止確率が50%より上か下かで停止通過を予測した場合の適中率および誤判率を示す。これを見ると、どちら

Table 5 Result of Estimation

MODEL-1 (50%-Probability Estimation)				
Estimation	Observed Response			
	Acceptance	Rejection	Total	Proportion
Good Estm.	469	1170	1639	86.3%
Bad Estm.	104	156	260	13.7%
MODEL-2				
Good Estm.	490	1173	1663	87.6%
Bad Estm.	101	135	236	12.4%

Table 6 Result of Estimation

MODEL-1 (90%-Probability Estimation)				
Estimation	Observed Response			
	Acceptance	Rejection	Total	Proportion
Good Estm.	245	813	1058	56.7%
Un-Estimated	313	500	813	42.8%
Bad Estm.	15	13	28	1.5%
MODEL-2				
Good Estm.	275	850	1125	59.3%
Un-Estimated	300	443	743	39.1%
Bad Estm.	16	15	31	1.6%

のモデルも8割以上の適中率であり、またモデル2の方がやや適中率が高いという結果となっている。

安全性制御においては、モデルから得られた不確かな予測結果をそのまま用いるより、不確かなケースは不確かであるという別のカテゴリで扱った方がより効果的な場合もあると考えられる。そこで、ロジットモデルから予測された停止確率が10%以下であれば「通過」と、また90%以上であれば「停止」と判別し、それ以外については「どちらともいえない」ケースとして判別を保留することにし、観測値との比較より誤判率を求めた。結果を Table 6 に示す。誤判別はどちらのモデルでも2%以下に収まった。また、どちらとも判別できない車は観測した車両のうちの4割程度となった。2つのモデルを比較すると、モデル2の方が判別できない車の数を抑えることができ、停止通過をより明確に予測できるといえる。

(4) これ以外に候補として考慮したモデル

ここで述べた2つのモデルの他に、定数項を交差点により変化させないもの、定数項以外も交差点により異なる値を持つもの、説明変数としてポテンシャルタイム以外に各種用いたモデルについてもあてはめを試みた。さらにモデル2では3つの状況の境界で停止確率が不連続になるがこれが連続するようパラメータ c を制約したものや、モデル2の第2の状況で各種変数を用いたものについても試みた。しかし、有意性の検討の結果、上述の2つが良好、すなわち未知パラメータが多くなりすぎず説明力が十分だったため、これを採用することとした。

5. クリアランス制御の方法論

(1) クリアランス制御の考え方

前章までで述べたように、信号を青から黄に変える瞬間の各車両の速度・位置およびその先行車の状況がわか

れば、運転者の停止通過の判断が推定できることが明らかになった。従って、その後起こる事象の安全面・円滑面からの評価が予め可能となる。そこで、黄開始時刻・黄時間・全赤時間のそれぞれについていくつかの候補をつくりリアルタイムで評価して最適値を求めれば、サイクルごとにこれを最適化することも可能である。

次の節ではそのための一般的な手順を提示し、続いてその具体的な典型例について説明する。

(2) クリアランス制御の手順

予め設定された標準的な青終了時刻が近づいてきたら、その時の接近しつつある車両の情報を用いて以下の手順によって最適なクリアランスの設定を求めることとする。

- i) 交差点手前のある範囲に存在する車両について、車両検知器等からその速度と停止線からの距離を得る。
- ii) i) を用いて現在以降ある範囲までの任意時刻(黄開始時刻の候補)での各車の位置および速度を推定する。
- iii) ii) の結果と停止判断モデルより、任意時刻に青から黄に変化させた場合の各車の停止確率を求める。
- iv) iii) の結果に対し、予め定めておいた方法で、各時刻で黄に変えることの安全面からの評価、その場合に安全上望まれる黄・全赤時間、およびそれについての円滑面からの評価を行う。
- v) iv) の結果から黄開始時刻の最適解を決定し、それに対応した黄時間・全赤時間を決める。
- vi) v) で決定した黄開始時刻までに時間がある場合には、一定時間経過後再度各車の位置速度データを得て、先に用いた推定将来値と差異を調べ、差異があれば ii) に戻って各車の将来値推定からやり直す。

各手順での具体的な作業の内容については対象交差点の特性や制御に対する理念、あるいは観測装置等の技術水準により異なってくると考えられる。以下の節では、各手順の具体的な内容についての典型的な例を示す。ただし、手順 iii) については第4章で述べたモデルを用いることとし、以下では触れない。

(3) 各車の観測データの入手および将来値の予測(手順 i) ii) vi)

現在平面街路で普及している超音波式の車両検知器では各車の検知器通過時の情報しか得られないが、各車の将来位置・速度を予測するための基礎情報として有用である。また、交差点にビデオカメラを設置して画像処理を行ってある範囲に存在する各車の位置・速度を得ることは現在の技術では可能であり、将来、コストおよび処理速度の改善により実用化が期待される。これを用いれば、より精度の高い予測が可能となる。さらに、複数組の検知器あるいはビデオにより各車を追跡した情報が入手できれば、以前の瞬間のデータや、手順 vi) で示されるように最適の黄開始時刻までに間がある場合につい

てはその間の速度変化の情報を、その後の予測に役立てることも可能である。

各車の将来値を予測する際には、予め何秒先までの予測を行うかについて考慮しておく必要がある。予測範囲を広げれば、より良い評価値を発見することが可能であるが、十分な精度で広い範囲の各車の位置・速度を予測することが必要となる。

予測には各車の速度あるいは加速度について構築したモデルを用いることが必要であるが、速度一定と仮定する、あるいは齋藤ら¹⁾のように加速度に上下限を設けてワーストケースで評価するといった方法も考えられる。

(4) 安全面からのクリアランス制御の評価指標(手順 iv)

a) 停止の際の減速度

停止の際に高い減速度が発生すると、後続車にとって迅速な対応が必要となり、これにヒューマンエラーが絡めば追突事故につながる。さらに、運転者は既にこの危険性を考慮して運転するのが通常であるため、高い減速度が避けられる代わりに、停止時に停止線を越えてしまったり、赤になっているにも関わらず交差点を通過するという行動となって表れることも多い。この問題は、May⁵⁾を初めとしクリアランス制御の研究において当初から考慮されてきた。

停止の際に一定の減速度で減速すると仮定すれば、停止に必要な減速度は次式で与えられる。

$$\alpha = V^2 / 2(L - VT_r) \dots \dots \dots (7)$$

ただし、V: 信号が黄に変わった瞬間の速度

L: 同、停止線からの距離

T_r: 黄に変わってから減速を始めるまでの遅れ時間

各車の停止確率が与えられれば、基準となる十分小さな確率 R_r (例えば0.1) よりもそれが小さければ通過すると考えられ、式(7)による評価は必要ない。それ以外のすべての車について求めたこの値が小さいほど望ましい。

b) 相前後する車両の停止判断矛盾の回避

各車両がそれぞれ異なる速度で交差点に接近し、また車両ごとに異なる判断基準で停止通過の判断を行う場合には、ある車両が通過しようとして判断しても、その先行車が停止しようとして判断する場合は考えられる。この場合、先行車がブレーキ操作を行うなどして初めて後続車が停止の必要性を認知するため、通常よりも減速開始が遅れ、大きな減速度、あるいは先行車に追突する危険性が生じる。この問題については、停止・通過がともに可能な「オプションゾーン」に該当する車両を極力減らすべきであることを Mahalel ら²⁾が指摘している。

停止確率が (1 - R_r) 以下の車について、それより前方に存在する停止確率が R_r 以上の車の台数を極力小さ

くすることが望ましい。

(5) 安全上望まれる黄・全赤時間 (手順 iv)

a) 赤通過回避に必要な黄時間

信号が黄に変わった瞬間に通過しようと判断した車両が、その後停止線を通る以前に、信号が黄から赤に変わってしまうと、法規に反すること、および次の現示との衝突の危険性があるといった背景から、その瞬間に急減速を行う危険性が考えられる。これを回避すべきであることがやはり古くから指摘されてきている。

通過車両が一定速度で通過すると仮定すれば、停止確率が $(1-Rr)$ 以下の通過の可能性のある車が停止線を越えるまで黄を続ける、すなわち次式を満たす必要がある。

$$A \geq L/V (=P) \dots\dots\dots (8)$$

ただし、A: 黄時間

P: 式(1)のポテンシャルタイム

b) 次の現示との衝突回避に必要な黄・全赤時間

通過と判断した車両が交差点を通過中に、次の現示が開始されて交差点に進入した車両や歩行者などと衝突することを回避する必要がある。これについても先と同様に古くから考慮されてきた問題である。

厳密には両者の軌跡交点で十分な時間差が生じれば良いが、安全側で考え、通過車両が軌跡交点を通過し終えるまでは次の現示を開始しないという、次式の条件を満たすことが必要と考えられる。

$$A + R_a \geq (L + L_c)/V \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 R_a : 全赤時間

L_c : 停止線から次の現示による進入車(者)との軌跡交点までの距離と、車長との和

(6) 円滑面からのクリアランス制御の評価指標 (手順 iv)

通常の信号の設定では、可能な限り信号待ちを抑えるよう、各現示に対して最適な有効青時間が割当てられる。また、隣接の信号の影響が大きい場合には、両者の青開始のオフセットも最適に設定された運用となっている。

しかし、現示ごとにクリアランス時間を制御することになれば、現示の有効青時間の終了時刻やその次の現示の開始時刻が毎回変化する。従って交差点の処理能力や通過交通の遅れ時間に影響するので、これを可能な限り良好に保てることが望ましい。そこでこの節では、この問題の定量的な評価の方法を、単独交差点の場合と、相対オフセットが問題となる系統制御交差点の場合とにわけて、以下に示す。

a) 捌け交通量の変化についての評価指標

クリアランス制御を行うと、制御対象方向すなわちサイクルごとに黄開始時刻や黄・全赤の長さを変える方向の捌け交通量と、それに後続して現示が与えられる方向の捌け交通量とに影響する。この内、後者についてはその変化分を次のサイクルでクリアランス制御対象方向に

転化すれば、影響を抑えることができる。そこでこのような転化がなされたときのクリアランス制御対象方向の捌け交通量の変化を求め、評価指標とすることとした。

さて、一般に非飽和で制御する場合には、飽和度が各流入方向で同程度になるように設定される。これは、ランダム要因によってある方向からの流入交通が増えても、それを捌くことができる余裕を各方向同程度確保しているものと考えられる。従って、クリアランス制御により青、黄、全赤を延長すると、その間に何台かを捌くことができるが、その分次サイクルの青時間を減らせば、ランダムな交通量増大に対する余裕が減少する。

そこで、あるサイクルの制御対象現示の標準的な青の終了時刻から次のサイクルの同終了時刻までの間で捌けうる台数を考えることにより、両者の影響を合わせた評価を行うこととした。評価の基準として仮想的に黄・全赤をまったく用いない状況を考えて、クリアランス制御を行った場合の次サイクルの青の減少は、青延長時間と黄・全赤時間の合計のみで決まる。これを T_a と表せば、これによる捌けうる台数の減少分は $Q_c T_a$ となる。ただし、 Q_c は飽和交通流率である。青延長・黄・全赤の間に捌ける台数は、各時間の長さや車両位置・速度そして運転者の通過判断によって影響されるが、前章のモデルで求めることができ N_a と表すこととする。このとき、求めるべき捌けうる台数の減少量は $Q_c T_a - N_a$ となる。さらに、これを Q_c で除した次式は、これと等価な捌け台数減少をもたらす損失時間と考えることができる。そこでこれを等価損失時間 T_{LE} と呼び、クリアランスの制御方法の違いによる捌け交通量の減少を評価する指標として用いることとする。これが小さくなることが望ましい。

$$T_{LE} = T_a - N_a / Q_c \dots\dots\dots (10)$$

b) オフセットの変化がもたらす問題点

クリアランス制御により青や黄・全赤を延長すれば、その合計量に応じて次の現示の開始時刻が遅れる。次現示が系統制御されている場合には、これが原因で系統が崩れる恐れがある。実際にどの程度まで許容されるのかは、スループンドの設定方法によって異なる。しかし、いずれにせよ最適のオフセットに基づいて定められた次現示の開始時刻からの遅延時間を最小にすることが望ましいと考えられる。また、クリアランス制御によって次現示開始を標準より早めることが可能な場合は、あえて早めずにその分を全赤時間に割り振ることで、次現示開始を変化させないでおくことができる。

標準の黄・全赤時間を、 T_{cs} と表すと、次現示開始の遅れ時間は次式のように表され、これが小さくなることが望ましいと考えられる。

$$T_D = \begin{cases} T_a - T_{cs} & \text{for } T_a > T_{cs} \\ 0 & \text{for } T_a \leq T_{cs} \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

(7) 最適解の決定方法 (手順 v)

これらの評価指標を用いると、円滑性と安全性がトレードオフ関係になる可能性が高い。しかし、両者の性格の違いから、まず最低限の安全性を確保することが優先されるべきである。従って各安全性評価指標に最低基準を設けておき、これが満たされる中で、他の指標が最も良好な値を示すものを最適解として採用すればよい。

6. シミュレーションによるクリアランス制御の評価

(1) シミュレーションの目的・方法

観測データに対して、上述の手順によるクリアランス制御のシミュレーションを行い、評価指標の達成状況を算出してこのような制御の実用性を明らかにするとともに、運転者の判断特性の予測に用いるモデルの違いによる目的達成への影響を明らかにすることとした。

Table 1 の観測交差点のうち地点番号 1 番のデータをシミュレーションにおける到着交通として用い、前章で述べた手順で黄開始時刻、黄時間、全赤時間をサイクルごとに求めた。具体的な手順の内容は以下とおりである。

a) 手順 i) ii) vi) について

車両の位置・速度は現実に青から黄に変化した時刻の観測データに基づき、さらに速度不変の前提をおいてそれ以後青延長を行った場合の位置・速度を予測した。予測範囲として -2~8 秒の青延長を考えることとした。

b) 手順 iii) について

停止判断モデルとして、第 4 章で述べたモデル 1 を用いた場合と、モデル 2 を用いた場合の 2 種類のシミュレーションを行った。

c) 手順 iv) について

前章で述べた各評価指標を求めた。なお、 $R_r=0.1$, $T_r=1$ (秒) とした。

d) 手順 v) について

安全性指標の判断矛盾台数については 0 台、 α については 2 m/sec^2 以下という 2 つの条件を設け、この順に優先的に扱い、両方が満足した場合に限り円滑性指標を考慮して最適解を選ぶこととした。円滑性指標は 2 種類のうちの 1 つを考え、用いる指標が異なる 2 通りのシミュレーションを行った。なお、 $Q_c=1800$ (台/時) を用いた。

シミュレーションは停止判断モデルが 2 通り、円滑性指標が 2 通りの、計 4 つの組み合わせについて実行した。

(2) 比較対象としての現況の評価値の計算

クリアランス制御の効果を評価する際の比較対象として、現況の信号制御下で観測された現実の状態についての評価値を、前述の各評価指標の定義式、式 (7) (10) (11) を用いて求めた。

式 (7) の V , L は実際に停止した車の観測値を用い

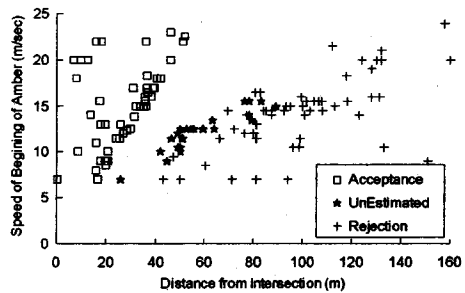


Fig.6 Speed and Distance of Beginning of Amber Under the Clearance Control

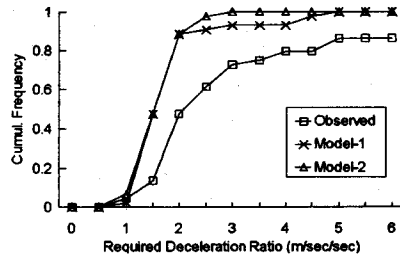


Fig.7 Distribution of Required Deceleration

た。なお停止線を越えて停止する場合、実際の減速度は式 (7) より小さくなるが、評価には本来必要な値としてこの式の値を使うこととした。式 (10) の N_a には黄以降に通過した台数のサイクル毎の観測値を用いた。 T_a は現況では黄+全赤時間 (= T_{cs}) に他ならない。しかし実際には全赤時間の間に通過しきれない車両が時に発生し、そのため次現示の開始が実質的に遅れることが観測された。そこで、そのようなサイクルでは最後の車が交差点を通過し終えるまでの時間を式 (9) 右辺により推定して T_a に用いた。 T_r , Q_c はシミュレーションと同じ値を用いた。

(3) クリアランス制御シミュレーションの結果

a) クリアランスの制御状況

シミュレーションでは、黄開始時刻はサイクルにより標準より -2~+7 秒程度変化させることとなった。その際の黄開始時における各車の速度位置分布とその時の停止判断モデルによる各車の停止判断の判別推定についての結果を Fig.6 に示す。この図はモデル 2 と式 (11) の円滑性指標を用いた場合のものである。現況の Fig.1 と比べればわかるように、停止の可能性がある車両は右下に分布し、必要減速度が小さくなることが伺える。さらに、通過が確実な車は図の左上に集中しており必要な黄・全赤時間は小さくてすむことがわかる。シミュレーションの結果では、黄時間は平均 2.2 秒、黄+全赤時間は平均 4.7 秒となり、現況の設定よりも小さいものとなった。

b) 安全性評価指標の結果

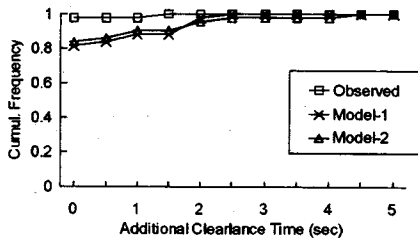


Fig.8 Distribution of Additional Time

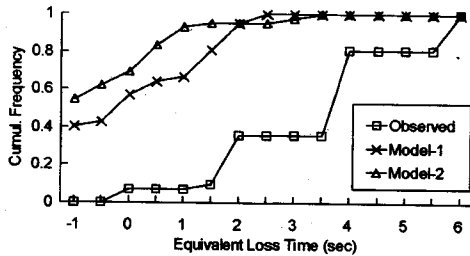


Fig.9 Distribution of Equivalent Loss Time

相前後する車両の停止判断の矛盾は、いずれのケースでも全サイクルを0台に抑えることができた。

式(7)で求めた必要減速度についてサイクルごとに最大値をとり、その累積相対頻度を示したのが Fig.7 である。この図は最適解を求める際の円滑性指標として、式(11)を用いたものであるが、式(10)を用いた場合でもほとんど同様の結果となった。

これを見ると、クリアランス制御を行えば、現況に比べ全体的に必要な減速度を小さくすることができ、ほとんどの場合に 2 m/sec^2 以下に収まることがわかる。また、単純なモデル1を用いた場合よりも、より複雑なモデル2を用いた方が 2 m/sec^2 以上の台数を一層小さくできることがわかる。

c) 円滑性評価指標の結果

円滑性指標として式(11)を用いたシミュレーションにおいて、サイクルごとに得られた次現示開始遅れ時間を累積相対頻度で示したのが Fig.8 である。これを見るとクリアランス制御を行った場合、標準に比べ遅れが生じないすなわち開始遅れが0秒以下の割合が80%強あり、また遅れ時間が2秒以内であるのは90%以上に達している。このことから、この交差点の場合、モデル1, 2ともにこの指標での円滑面のデメリットは殆ど無いといえる。

円滑性指標として式(10)を最適化した場合の、この指標の値を Fig.9 に示す。これを見ると、クリアランス制御を行えば全般的には無駄なクリアランス時間を節約することができ、円滑性を改善する効果も見られる。特にモデル2で顕著である。

7. 結 論

本研究において得られた新たな知見は次の通りである。

- i) 運転者の停止判断は、従来から言われている信号が青から黄に変わった瞬間の停止線からの距離と速度のほか、同じ瞬間の先行車の位置や速度により有意に影響を受けることが明らかになった。また、黄・全赤時間の設定には影響されにくいという結果が得られた。
- ii) これらの運転者の停止判断の特性を表現するモデルを構築した。これによって運転者の停止判断を良好に再現できることが明らかになった。
- iii) 運転者の停止判断モデルと、安全性・円滑性の評価指標を組み合わせ、最適と考えられるクリアランス制御を行う方法についての一般的な枠組みを示した。また、これに用いるために、既往の研究で提案されてきた安全性指標を整理するとともに、円滑性とのバランスを考えるための評価指標を新たに誘導し提示した。
- iv) 観測データを用いたシミュレーションにより、このクリアランス制御の実用性を検討した。その結果、安全面で顕著な効果を持っていること、また、円滑面への悪影響は小さく、逆に円滑性を改善できる場合もあることが明らかになった。さらに、運転者の停止判断を表現するモデルがより詳細であれば、これらの効果が一層高まることが明らかになった。

本研究では、制御方法の枠組を一般的に示すとともに、現在の知見で有効と思われる方法を提示したが、今後は、制御の手順の各段階について、より信頼性・実用性を高めた方法を開発することが必要と考えられる。

参 考 文 献

- 1) W.L. Williams : Driver behavior during the yellow interval, T.R.R., No.644, pp.75~78, 1977.
- 2) D. Mahalel and D.M. Zaidel : Safety evaluation of a flashing-green light in a traffic signal, Traf. Eng. & Control, Vol.26, No.2, pp.79~81, 1985.
- 3) C.J. Baguley : "Running the red" at signals on highspeed roads, Traf. Eng. & Control, Vol.29, No.7/8, pp.415~420, 1988.
- 4) 齋藤威・菊地英紀・野田素良 : ジレンマ感応制御とその実験結果について, 第11回交通工学研究発表会論文集, pp.129~132, 1991.
- 5) A.D. May, Jr : Clearance interval at traffic signals, H.R.R., No.221, pp.41~71, 1968.
- 6) F.B. Lin and S. Vijaykumar : Timing design of signal change interval, Traf. Eng. & Control, Vol.29, No.10, pp.531~536, 1988.
- 7) 大蔵泉・長谷川秀・依田育也 : 信号現示変わり目における車両の挙動特性, 土木計画学研究・論文集, No.7, pp.275~282, 1989.

-
- 8) Y.M.M. Bishop, S.E. Fienberg and P.W. Holland : —theory and application to travel demand, The M.I.T. Discrete multivariate analysis—theory and practice, The M.I.T. Press, p.125, pp.457~518, 1975. Press, p.28, pp.165~178, 1985. (1993.8.2 受付)
- 9) M. Ben-Akiva and S.R. Lerman : Discrete choice analysis
-

INTER-GREEN CONTROL WITH THE CONSIDERATION OF DRIVERS' BEHAVIOR

Minoru YAMADA, Yasuo MORI and Tôru SUZUKI

While the real-time optimizing technology of inter-green setting has become applicable, still it is required to understand drivers' behavior more accurately for the more efficient operation.

In this study, the drivers' behaviors in facing to amber signal was analyzed. Then two mathematical models to describe the behavior were build using the factors including the relations to its leading vehicle. It was clarified that drivers' behavior is well predictable by this model.

Also, a procedure was presented to optimize inter-green setting in real-time computing with these prediction models, and the evaluation of this procedure with simulation was carried out. Then the characteristics of this procedure were clarified.
