

通過帯幅最大化制御における 交通信号システムのサブエリアへの最適分割

久 井 守*

On the Optimal Division of Traffic Signal Systems Controlled
by the Band Width Maximization Principle into Some Subareas

Mamoru HISAI*

Abstract

This paper describes the optimal division of traffic signal systems controlled by the band width maximization principle into some subareas. The band width maximization principle has been widely used to optimize the offset patterns of signal coordinations. It also seems that from a viewpoint of delay minimization, this principle can give good control under the condition of light traffic.

However, there is a problem in this principle that the more the number of signals in the study section is, the narrower the band width is. Therefore, it may be better to divide all the signals into some groups and to control each group of signals as a subarea that is independent of each other. So, in this paper, an optimization technique is proposed to divide the signal systems into some subareas and to optimize the cycle lengths and the offset patterns of each subarea by dynamic programming.

A BASIC program was made to perform the optimization and to draw the through-bands on the graphic display easily by using personal computer.

1. はしがき

交通信号機の系統制御においては、通過帯幅(スルーバンド幅)を最大にすることを目的としてオフセットを最適化することが以前から広く行われている。この通過帯幅最大化制御は、理論的には必ずしも円滑な交通を保証するものではないが、軽交通の条件下では、遅れ最小の観点からみても比較的優れた制御になり得る。また現場では、通過帯(スルーバンド)を基礎として系統化の検討を行うことが多いと思われる。このように考えると、通過帯法は、単なる平面幾何学的考察によ

る方法であるという理論的欠陥にもかかわらず、その実用的価値はなお失われていないといつてよいであろう。

しかし通過帯法によって系統制御のオフセット最適化を行う場合、対象路線の交差点数が多くなると、得られる通過帯幅が次第に小さくなるという問題点ををさけて通ることができない。したがって、交差点数が多い場合には、全体を1つの系統化路線として通過帯幅最大化制御を行うより、対象路線をいくつかのサブエリアに分割して、それぞれのサブエリアごとに通過帯幅最大化制御を行う方が、全体としてむしろ制御効率が向上するのではないかとということが1つの検討課題として考えられる。したがって、本研究ではDPの手法によって系統化路線を最適分割し、かつ各サブエリアの最適共通周期と最適オフセットを求めることがで

* 土木工学科

きる1つの方法を提案する。またパソコンがあれば、系統化の検討が手軽に行うことができるようにするため、最適化計算と通過帯のグラフィック表示を同時に行う BASIC プログラムを作成した。

2. 最適分割の定式化

いまサブエリア分割の対象路線として、Fig.1に示すように N_S 個の信号交差点、すなわち $(N_S - 1)$ 個の信号区間からなる路線を考える。各信号区間の区間距離(m)および区間速度(m/秒)、各信号のスプリット(青時間比率)および最小周期(秒)は計算条件として与えられるものとする。ここに区間速度は各信号区間ごとに異なってもよいが、上下両方では等しいものとする。また各信号のスプリットと最小周期は交差点の道路交通条件から別途何らかの方法で定められるものとする。

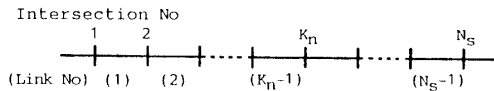


Fig. 1 Study section of coordinated traffic signal system

対象路線を N 個のサブエリアに最適分割するための目的関数は各信号区間の通過帯幅を合計したものとする。ただし本研究では、平等オフセットのみを検討の対象とし、したがって上り下り両方向の通過帯幅は互いに相等しいものとする。このように考えると目的関数 J は次式のように書くことができる。

$$J = \sum_{k=1}^{N_S-1} b_k \quad (1)$$

ここに b_k は信号区間 k の通過帯幅(単位は対周期比)である。ただし信号区間 k がサブエリアの境界となり、この区間で通過帯が分断される場合は $b_k = 0$ とする。Fig.2はサブエリアが2つ($N = 2$)の場合について、通過帯を時間距離図上に示し、また同時に b_k の定義をも示したものである。

式(1)を DP の関数方程式で表すと次の式(2)~(4)のようになる。

$n = 1$ (サブエリアが1つ)の場合の関数方程式は

$$f_1(K_1) = B(1, K_1) \quad (2)$$

$$(K_1 = 2, 3, \dots, N_S)$$

である。ここに $f_1(K_1)$ および $B(1, K_1)$ は交差点 $1 \sim K_1$ の間の K_1 個の信号交差点を1つのサブエリアとして、連続通過帯幅が最大になるように共通周期とオフセットを最適化し、その場合に得られる通過帯幅を、 $(K_1 - 1)$ 個の信号区間について合計したものの最大値である。

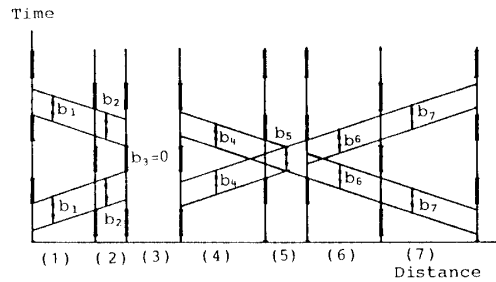


Fig. 2 Definition of band width b_k in each link

この $B(1, K_1)$ の内容を式で表現すると

$$B(1, K_1) = \sum_{k=1}^{K_1-1} b_k = (K_1 - 1) b_1 \quad (3)$$

のように書くことができる。

$n \geq 2$ (サブエリアが2つ以上)の場合の関数方程式は次のようになる。

$$f_n(K_n) = \max_{2(n-1) \leq K_{n-1} \leq K_n - 2} \{ f_{n-1}(K_{n-1}) + B(K_{n-1} + 1, K_n) \} \quad (4)$$

$$(K_n = 2n, 2n + 1, \dots, N_S)$$

ここに $f_n(K_n)$ は交差点 $1 \sim K_n$ を n 個のサブエリアに最適分割し、各サブエリアの連続通過帯幅が最大になるように共通周期とオフセットを最適化したときに得られる通過帯幅の合計の最大値である。 $B(K_{n-1} + 1, K_n)$ は交差点 $K_{n-1} + 1$ から交差点 K_n までの区間を1つのサブエリアとして共通周期とオフセットを最適化したときに得られる通過帯幅の合計の最大値である。 $f_n(K_n)$ と $B(K_{n-1} + 1, K_n)$ の間の関係は Fig.3に示すとおりである。

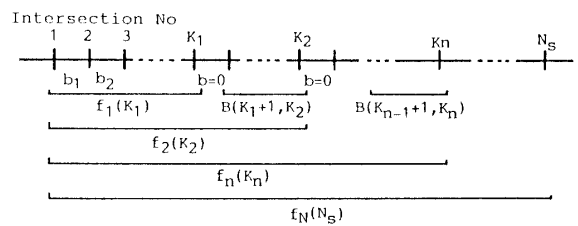


Fig. 3 Relationship between $f_n(K_n)$ and $B(K_{n-1} + 1, K_n)$

3. 計算方法と計算例

3.1 計算条件

Fig.4に示す15交差点からなる路線を対象として計算を行う。各信号区間の区間距離、各信号のスプリットおよび最小周期などの計算条件は図のように与えられているものとする。区間速度は各区間、上下両方向と

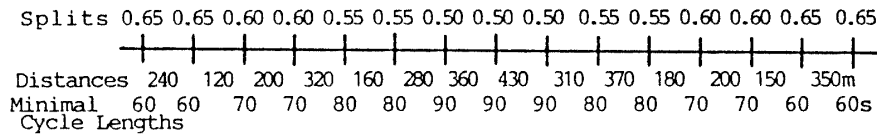


Fig. 4 Example

も12m/秒とする, また共通周期の上限値は120秒とする, サブエリアの共通周期については, 各交差点の最小周期のうちの最大値以上で, かつ共通周期の上限値以下の範囲を10秒きざみで探索し, サブエリアの連続通過帯幅 b を最大にする共通周期を求め, これをサブエリアの最適共通周期とする.

各サブエリアの通過帯幅最大化オフセットは適当な方法で求めればよいが, ここでは高田らによる方法²⁾をサブルーチン化しておき, これによって各サブエリアの連続通過帯幅を最大化する平等オフセットを求めた. 高田らによる方法は, 信号区間ごとに速度は異なってもよいが, 上下両方向については速度が等しいという条件で, 基本的には平等オフセットを求める方法である. この方法を用いたのは, 計算表に基づいて比較的簡単に平等オフセットを求めることができるからである.

計算結果を Table 1 に示す. Table 1 は DP による計算を, 計算表の形式で示したものである. この表に基づいて DP の計算方法を説明する.

3.2 第1段階の計算

まず $n = 1$ (第1段階) の場合は, 式(2)によって DP 計算を行う. これは最初のサブエリアの最適共通周期 T_1 と平等オフセットを求め, 連続通過帯幅 b を求める段階である.

$n = 1$ の表の第1行は, $K_1 = 2$ すなわち交差点1~2の2交差点をサブエリアと考えた計算結果である. 交差点1~2の最小周期はいずれも60秒であるから, 60, 70, ..., 120秒の7通りの各共通周期について, 平等オフセットを求め, その中から通過帯幅最大のものを選んだ結果, 共通周期 $T_1 = 60$ 秒のとき最大通過帯幅 $b = 0.483$ である. また式(3)より $f_1(2) = 0.483 \times 1 = 0.483$ である.

表の第2行は, $K_1 = 3$ すなわち交差点1~3の3交差点をサブエリアと考えた計算結果である. 交差点1~3の最小周期はそれぞれ60, 60, 70秒で, それらのうち最大値は70秒であるから, 70秒以上でかつ120秒以下, すなわち70, 80, ..., 120秒の各共通周期について平等オフセットを求め, その中から通過帯幅最大のもの

のを選んだ結果, $T_1 = 70$ 秒のとき $b = 0.436$ であり, また式(3)より $f_1(3) = 0.436 \times 2 = 0.872$ である. $K_1 = 4$ 以下についても同様に計算する.

最後の $K_1 = 15$ の場合は, 15個の交差点全体を1つのサブエリアと考えた計算結果である. 15個の交差点の最小周期のうちの最大値は90秒であるから, 90秒以上でかつ120秒以下, すなわち90, 100, 110, 120秒の4通りの周期について平等オフセットを求め, その中から通過帯幅最大のものを選んだ結果, $T_1 = 120$ 秒のとき $b = 0.186$, $f_1(15) = 0.186 \times 14 = 2.604$ である.

$n = 1$ の表から K_1 と b の関係を取り出し, それを図示すると, Fig.5 のようになる. この図から, 対象路線の交差点数が多くなればなるほど, 連続通過帯幅が次第に小さくなるということがわかる.

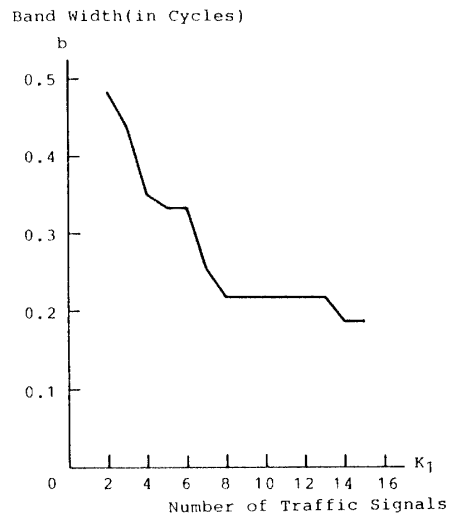


Fig. 5 Relationship between band width and the number of traffic signals

3.3 第2段階の計算

つぎに $n = 2$ (第2段階) の場合は, 式(4)によって計算する. この段階の計算は交差点1~ K_2 を2つのサブエリアに最適分割する計算段階である.

$n = 2$ の表の第1行は $K_2 = 4$ の場合の計算である. すなわち, 交差点1~4を対象とする. この4交差点を2つのサブエリアに分割する仕方は1通りしかない.

Table 1 A result of computation by dynamic programming

$n=1$

K_n	$f_n(K_n)$	b	T_n
2	0.483	0.483	60
3	0.872	0.436	70
4	1.050	0.350	100
5	1.332	0.333	100
6	1.665	0.333	100
7	1.524	0.254	90
8	1.519	0.217	120
9	1.736	0.217	120
10	1.953	0.217	120
11	2.170	0.217	120
12	2.387	0.217	120
13	2.604	0.217	120
14	2.418	0.186	120
15	2.604	0.186	120

$n=2$

K_n	$f_n(K_n)$	b	T_n	K_{n-1}
4	0.944	0.461	120	2
5	1.280	0.408	80	3
6	1.638	0.383	80	3
7	1.663	0.331	120	5
8	1.998	0.333	90	6
9	2.165	0.250	120	6
10	2.415	0.250	120	6
11	2.665	0.250	120	6
12	2.915	0.250	120	6
13	3.165	0.250	120	6
14	3.282	0.231	90	6
15	3.513	0.231	90	6

$n=3$

K_n	$f_n(K_n)$	b	T_n	K_{n-1}
6	1.383	0.439	120	4
7	1.611	0.331	120	5
8	1.971	0.333	90	6
9	2.138	0.250	120	6
10	2.388	0.250	120	6
11	2.638	0.250	120	6
12	2.951	0.393	90	9
13	3.226	0.307	120	8
14	3.436	0.521	120	12
15	3.863	0.474	90	12

$n=4$

K_n	$f_n(K_n)$	b	T_n	K_{n-1}
8	1.716	0.333	90	6
9	2.009	0.398	90	7
10	2.283	0.312	90	8
11	2.585	0.307	120	8
12	2.924	0.393	90	9
13	3.199	0.307	120	8
14	3.472	0.521	120	12
15	3.899	0.474	90	12

$n=5$

K_n	$f_n(K_n)$	b	T_n	K_{n-1}
10	2.028	0.312	90	8
11	2.402	0.393	90	9
12	2.795	0.393	90	9
13	3.046	0.461	120	11
14	3.445	0.521	120	12
15	3.872	0.474	90	12

$n=6$

K_n	$f_n(K_n)$	b	T_n	K_{n-1}
12	2.478	0.450	120	10
13	2.863	0.461	120	11
14	3.316	0.521	120	12
15	3.743	0.474	90	12

$n=7$

K_n	$f_n(K_n)$	b	T_n	K_{n-1}
14	2.999	0.521	120	12
15	3.426	0.474	90	12

すなわち、最初のサブエリアは交差点1~2、第2のサブエリアは交差点3~4である(この場合は $K_1=2$)、交差点3~4を1つのサブエリアとして各共通周期について平等オフセットを求めた結果、 $T_2=120$ 秒のとき通過帯幅の最大値が $B(3, 4)=b=0.461$ と得られた。したがって、式(4)より $f_2(4)=f_1(2)+B(3, 4)=0.483+0.461=0.944$ となる。ただし $f_1(2)$ の値は $n=1$ の表から読み取る。

$K_2=5$ の場合は交差点1~5を2つのサブエリアに最適分割する計算である。この5交差点を2つのサブエリアに分割する方法は2通りある。すなわち第2の

サブエリアを交差点3~5(この場合は $K_1=2$)とするか、または交差点4~5(この場合は $K_1=3$)とするかのいずれかである。したがって式(4)より $f_1(2)+B(3, 5)$ および $f_1(3)+B(4, 5)$ を求め、いずれか大きい方を $f_2(5)$ とする。 $f_1(2)$ 、 $f_1(3)$ は $n=1$ の表ですすでに得られているのでその値を用いる。 $B(3, 5)$ 、 $B(4, 5)$ はそれぞれ交差点3~5、交差点4~5をサブエリアとする平等オフセットから求める。計算の結果、 $K_1=3$ (最初のサブエリアが交差点1~3)のとき $f_2(5)=1.280$ で最大となった。またこのとき、第2のサブエリア(交差点4~5)の連続通過帯幅の合計の最大値は $T_2=80$ 秒のとき $B(4, 5)=0.408 \times 1=0.408$ である。

$K_2=6$ の場合は、 $f_1(2)+B(3, 6)$ 、 $f_1(3)+B(4, 6)$ 、 $f_1(4)+B(5, 6)$ を求め、そのうち最大のものを $f_2(6)$ とする計算である。計算の結果、 $K_1=3$ のとき $f_2(6)=1.638$ で最大となった。このとき、第2のサブエリアの連続通過帯幅の合計の最大値は $T_2=80$ 秒のとき、 $B(4, 6)=0.383 \times 2=0.766$ である。以下同様にして $K_2=15$ まで計算して第2段階の計算を終了する。

3.4 第n段階の計算

一般の第 n 段階では、第2段階の計算と同じく、式(4)によって f_n を計算する。これはすでに前段階で求めている f_{n-1} と、平等オフセットの計算から求める B を組合せ、その組合せの中から、 $\{f_{n-1}+B\}$ の最大値を求めて f_n とする計算である。

3.5 最適解の決定

第1段階から最終の第 N 段階までの計算が終了すると、最適解は最終の第 N 段階から逆にたどることによって求める。Table 1は $n=7$ までの計算を行った結果である。この表から最適解の求め方を示すとつぎの通りである。

対象路線の全交差点を1つにまとめて系統制御する場合の最適解は $n=1$ の表から求める。この表の $K_1=15$ の行から、共通周期120秒で制御するのが最適であることがわかる。この場合の連続通過帯幅は $b=0.186$ で最大となり、目的関数値は $f_1(15)=2.604$ となる。

対象路線を2つのサブエリアに分割する場合の最適解は次のようにして求める。まず $n=2$ の表より $K_2=15$ の行をみて、 $T_2=90$ 秒、 $K_1=6$ を読み取り、次に $n=1$ の表より $K_1=6$ の行をみて、 $T_1=100$ 秒を読み取る。この結果から、交差点1~6は周期100秒、交差点7~15は周期90秒で制御するのがよく、この場合の目的関数値は $f_2(15)=3.513$ となる。なお交差点1~6のサブエリアの連続通過帯幅は0.333、交差点7~15は0.231

である。

3分割の場合の最適解も同様して求めることができる。まず $n=3$ の表より $K_3=15$ の行をみて、 $T_3=90$ 秒、 $K_2=12$ を読み取る。次に $n=2$ の表より $K_2=12$ の行をみて、 $T_2=120$ 秒、 $K_1=6$ を読み取る。さらに $n=1$ の表より $K_1=6$ の行をみて、 $T_1=100$ 秒を得る。したがって交差点1~6は周期100秒、交差点7~12は周期120秒、交差点13~15は周期90秒で制御するのがよく、この場合の目的関数値は $f_3(15)=3.863$ となる。なお交差点1~6のサブエリアの連続通過帯幅は0.333、交差点7~12は0.250、交差点13~15は0.474である。

これらの3ケースのオフセットパターンとスループンドをFig.6, Fig.7, Fig.8に示す。これらの図はグラフィック画面をハードコピーして得たものである

3.6 分割数

系統化路線をサブエリアに分割する場合、最適の分割数をどう決めるかという問題がある。本研究の計算例を用いて、分割数 n と目的関数 $f_n(15)$ の関係を示すと、Fig.9のようになる。この図から判断すると、4分割するのが最適であるということが出来る。ただしこの分割数はやや多すぎるように思われる。目的関数の選び方も関連するが、分割数の最適化についてはさらに検討することが必要であると考えられる。したがって現段階では、これらの計算結果から総合的判断によって分割数を決めるのがよいであろう。

3.7 周期を指定して平等オフセットを求める場合

本研究では共通周期に一定の範囲を設けておいて、共通周期を最適化するようにしているが、全信号の周期を特定の値に指定して、サブエリアの分割と各サブエリアの平等オフセットを求めることもできる。その場合は、計算条件として各信号の最小周期と、共通周期の上限値をすべて同一の値に指定して計算すればよい。

4. むすび

本研究では、通過帯法における系統制御路線のサブエリア分割問題はDPによって最適化できることを示した。DP計算では目的関数や制約条件はかなり柔軟に組み込むことができるので、今後はこれらの点について検討することが必要である。目的関数については、最適分割数がうまく求められるようなものにする。また制約条件については、例えば区間距離が短い区間ではサブエリアへの分割は行わず、かつ同時式オフセッ

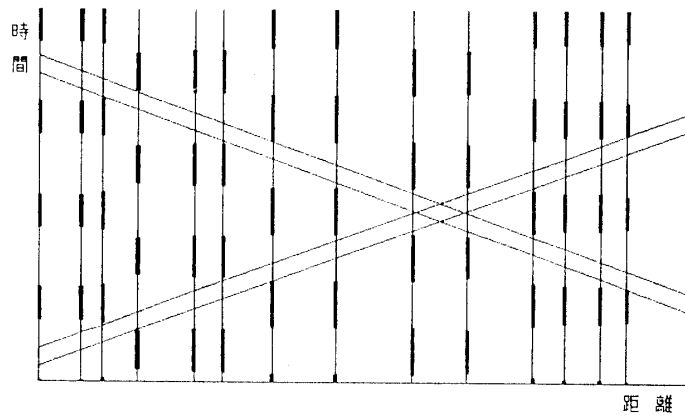


Fig. 6 Example of offset patterns and through-bands drawn on the graphic display (a case of one subarea)

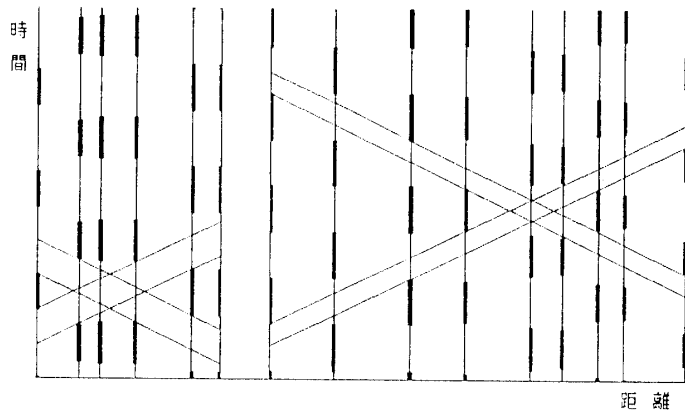


Fig. 7 Example of offset patterns and through-bands drawn on the graphic display (a case of two subareas)

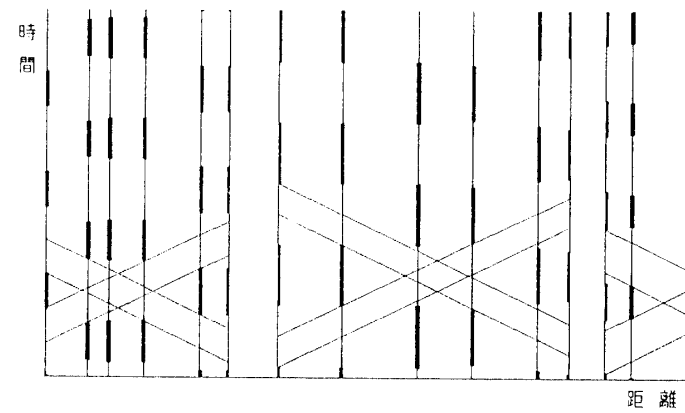


Fig. 8 Example of offset patterns and through-bands drawn on the graphic display (a case of three subareas)

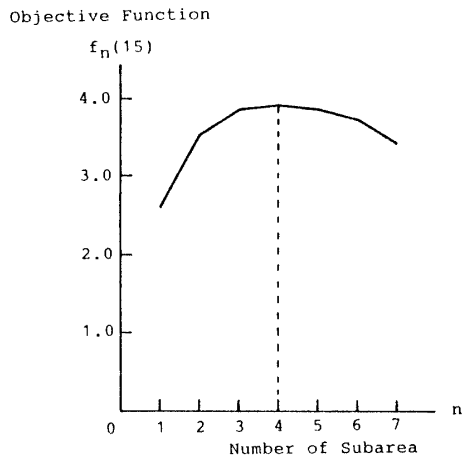


Fig. 9 Relationship between objective function and the number of subarea

トを与えるような制約を設けることが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 久井 守・岡本哲典：通過帯法における系統制御路線の分割制御，土木学会第42回年次学術講演会講演概要集第4部，pp.68~69，昭和62年9月
- 2) 高田 弘・栗本 譲：系統信号方式による街路交通制御に関する一考察，土木学会論文集，第124号，pp.11~20，昭和40年12月

(昭和63年10月14日受理)