

渋滞抑制のための交通信号運用のシミュレーションとパラメータ制御

M2015SC001 後藤大志

指導教員：大石泰章

1 はじめに

自動車は生活する上で必需品となっており、世界中で自動車の保有台数は増加し続けている。しかしながら、その一方で交通渋滞の発生やそれに伴う交通事故の増加、交通渋滞による経済的損失、排気ガス等による環境問題や交通公害など、悪影響を与えている事実も否定できない。このような問題に対し、交通状態の円滑化や遅れ時間の解消に有効な交通信号の制御は大きな効果を発揮すると考えられる。交通信号の制御は主にサイクル長、スプリット、オフセットと呼ばれる3つのパラメータを制御し、交差点における渋滞の解消や事故率の減少を主目的としている。交通信号のパラメータを適切に設定することで、交通渋滞を緩和することが可能となる。近年では車両感知器の導入による正確なデータの収集や交通状態の把握も行えるようになり、交通の円滑化に一役買っている。現在までに提案されている交通信号の制御法として、時間帯や曜日に応じてあらかじめ現示、サイクル長、スプリット、オフセット等のパラメータを作成、設定しその組み合わせの中から1つを選択し運用する定周期制御や、車両や歩行者の情報をセンサ等で得て、その情報に基づいたパラメータの制御を行う交通感応制御等の手法が提案されている。しかしながら、どの手法にも長所と短所が存在し、どの手法が最善であるのか意見の一致を見るに至っていない [1]。

本研究の目的は、交通シミュレーションを行うプログラムを作成し、制御工学のアプローチで交通信号の制御を行う文献 [2] の方法について、方法の検証・評価を行うことである。交通シミュレーションは、文献 [3] のものを参考にすが、文献 [3] のシミュレーションが左折を含まない単一交差点に関するものであるのに対して、本研究では左折を含む、2交差点からなる道路網を対象とする。また、作成した交通シミュレーションを用いて、制御パラメータが交通信号に与える影響およびその設計法の考察を行う。

2 交通シミュレーション

2.1 交通信号のパラメータ

本研究で使用する交差点モデルについて、文献 [1] に基づきサイクル長、スプリット、オフセットの3つのパラメータの説明を行う。サイクル長とは信号現示が一巡する時間のことを指し、これを T 秒とする。ただし現示とは、1つの交差点における1組の交通流に対して与えられている通行権、またはその通行権が割り当てられている時間帯のことを指している。スプリットとは各現示に割り当てられている時間のサイクル長に対する割合を指す。各現示に割り当てられているスプリットをすべて足し合わせると1になる。また、本来の信号現示には黄色信号等の損失時間

が存在するため、損失時間を除いた有効青時間と呼ばれる時間を用いることがあるが、本研究では有効青時間は用いないものとする。オフセットとは複数の交差点において、青時間の開始時刻の差を指す。隣接する交差点と相互に連動させるために用いられるパラメータである。オフセットの制御はサイクル長やスプリットの制御と比較して効果が得られないという報告もあり [4]、本研究のシミュレーションにおいてオフセットの値は0として進める。

2.2 信号現示

本研究のシミュレーションでは4種類の信号現示を用いて信号制御を行う。4現示の詳細を図1に示す。現示1は x 方向(東西方向)においては赤信号、 y 方向(南北方向)においては青信号を示す。現示2は x 方向においては赤信号、 y 方向においては右折信号を示す。現示3は x 方向においては青信号、 y 方向においては赤信号を示す。現示4は x 方向においては右折信号、 y 方向においては赤信号を示す。すべての現示について、赤信号はその方向において通行の禁止、右折信号は右折車のみが通行可能であることを示している。今回用いる交差点における現示の順番は図1の現示1、現示2、現示3、現示4の順番で移り変わるものとする。現示4の後は再び現示1、現示2、...というように繰り返す。 i 番目の交差点における現示1から現示4のスプリットをそれぞれ $g_{i,1}$, $g_{i,2}$, $g_{i,3}$, $1 - g_{i,1} - g_{i,2} - g_{i,3}$ とする。本研究にて扱うリンクの詳細な図を図2に示す。さらに本研究にて扱うについて道路網について説明を行う。実験がスタートした段階での y 方向の青信号(現示1)の点灯時間は60秒(スプリット0.5)、 y 方向の右折信号(現示2)の点灯時間は8秒(スプリット0.067)、 x 方向の青信号(現示3)点灯時間は45秒(スプリット0.375)、 x 方向の右折信号(現示4)点灯時間は7秒(スプリット0.058)とする。実験開始時刻と同時に y 方向の青信号が点灯し始め、現示1の点灯時間経過後、現示2に移りこの後の現示についても同様の手順にて進行していく。

2.3 道路網

今回の研究で使用する道路網は文献 [2] でも使われたものであり、図2のようにリンク集合 $L = \{L_1, L_2, \dots, L_{14}\}$ 、および交差点集合 $J = \{J_1, J_2\}$ によって構成されている。また、図3で示されているように全車線が独立した3車線で構成されている。各交差点 $J_i \in J$ に対して $L_j \in I_i$ は流入リンク、 $L_j \in O_i$ は流出リンクを表す。例えば図2の交差点1において L_3, L_5, L_7 は流入リンク、 L_4, L_6, L_8 は流出リンクである。本研究を進める上での過程を以下に示す。交差点 $j=1$ 、交差点 $j=2$ のどちらも流入リンク $L_i \in I_j$ から流出リンク $L_o \in O_j$ への分岐率 $b_{i,o}$ は既知

であり固定されているものとする。交差点 $j=1$ または交差点 $j=2$ へのすべての流入リンクに対して、流入した全車両の 50% が交差点で直進し、25% が左折、25% が右折するものとする。この分岐率は全てのリンクについて適用される。この条件は以後シミュレーション中に変更しないものとする。

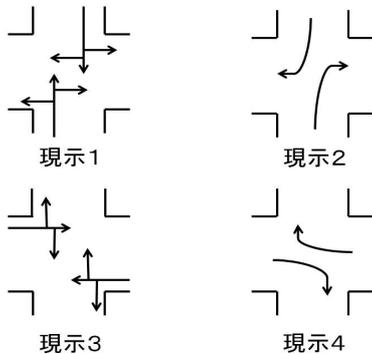


図1 交差点における現示

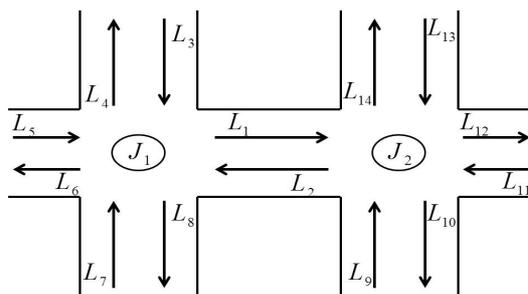


図2 リンクの詳細図

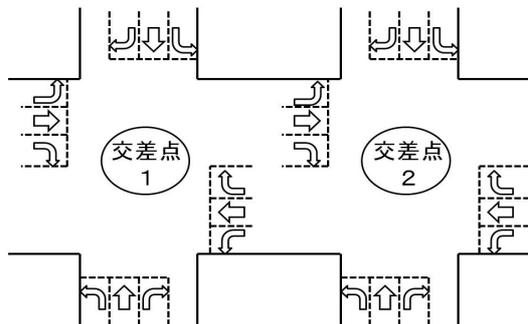


図3 交差点の概略図

2.4 車両の挙動

各交差点における車両の流入率については表1のように設定する。ここでの流入率の値は1秒あたりの車両の流入

台数を指している。この値は実験の最中では変更されることはないものとする。次に各リンクにおける流入車両について説明を行う。各方向から交差点に流入する車両の台数は互いに独立で、表1に示す生起率のポアソン過程に従っているものとする。2交差点の接続部である L_1 と L_2 以外の外部からの流入方向のリンクにおいては、信号の現示に関係なく、車両が常に各方向から交差点に流入する。進行方向に対して赤信号が表示されていた場合、流入した車両は右折、左折、直進のすべての車線で待ち行列を形成する。反対に、青信号が表示されていた場合は3車線で動作が異なる。まず直進車両は、待ち行列が存在しない場合はそのまま車両が通過する。待ち行列が存在する場合は、待ち行列の最後尾に新たに行列を形成する。その一方で待ち行列の先頭では車両が流出していく。本研究において、直進車線の待ち行列の減少の割合は1秒当たり1.5台としている。

右折専用車線は、待ち行列が存在する場合は対向車線の直進車両の間に十分な距離があるかどうかで右折ができるかどうかを判断する。右折が可能となる対抗直進車線の車両間隔は4秒以上とする。青信号における右折車線の待ち行列が1台も存在していない場合は、対向車の確認のために減速をおこなうため、待ち行列を形成するものとする。右折車線における待ち行列の減少の割合は1秒当たり0.8台とする。

左折車線については基本的には直進車線の挙動と同じである。待ち行列が存在するならば最後尾に着き待ち行列に並ぶ。異なる部分は横断歩道が存在しているため、直進の場合の待ち行列の減少割合より減少割合が小さいということである。本研究では左折車線における待ち行列の減少の割合は1.0とする。 d_{it} で表され、今回は1.0とする。待ち行列が存在しない場合は安全確認のため停止し待ち行列を形成する。

青信号の現示が終了すると、右折専用信号の現示が始まる。右折専用信号では直進と左折車線では通過ができなくなるため、到着した車両は待ち行列を形成していく。右折信号では、青信号のときは異なり対向車の確認をしなくてすむようになる。そのため、待ち行列が存在しない場合は青信号における直進車線と同様にそのまま右折を行う。待ち行列が存在した場合、到着した車両は待ち行列の最後尾に着く。また待ち行列の先頭から1秒当たり d_{rt} 台の割合で車両が流出していく。この値は青信号時の右折車線の車両流出台数とは異なり、1.2に変化する。最後に今回の実験における外乱は、細い路地からの流入と流出として扱い、 L_1 、 L_2 のどちらも1時間当たり20台の流入と流出とする。

以上の条件のもと、MATLABを用いて約2000行のシミュレータを作成した。これを用い、サイクル長を100秒、 L_1 と L_2 のリンク長を300[m]として100サイクルのシミュレーションを行った結果の前半40サイクル部分を図4に示す。赤色の実線がリンク L_1 における待ち行列長

の推移、青色の実線がリンク L_2 における待ち行列長の推移を表している。今回は L_1 と L_2 における待ち行列長の限界値を 100 台として実験を行った。開始から約 2000 秒までは待ち行列を処理できているが、それ以降徐々に増加しはじめ、3000 秒の到達前に待ち行列長の限界値である 100 台に到達し、それ以降増加を続けてしまった。そのため次の 2 つの章にて、スプリットの値の調節を行う。

表 1 各リンクにおける車両の流入率

流入リンク	流入率
L_3	$\lambda_3=0.4$
L_5	$\lambda_5=0.45$
L_7	$\lambda_7=0.3$
L_9	$\lambda_9=0.25$
L_{11}	$\lambda_{11}=0.4$
L_{13}	$\lambda_{13}=0.35$

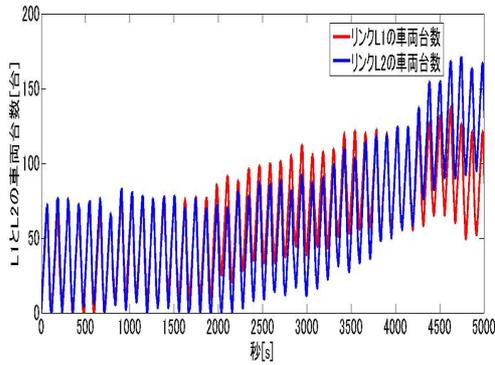


図 4 スプリット固定時の車両の台数

3 パラメータ制御

3.1 簡易的なスプリットの調節

信号のパラメータが適切であるかどうかを判断するための基準は待ち行列長の増減や遅れ時間の合計などいくつか存在する。今回は待ち行列長をスプリットの値を調節するための指標にし、制御することを試みる。現実の交差点において、待ち行列長はセンサや感知機によって容易に測定することが可能である。直進と左折車線において 3 サイクル連続で待ち行列長が零にならなかった場合、その方向の青信号の長さを 5% 増加させる。交差する方向の信号の青時間は増加させた分だけ減少させる。どちらの方向についても青信号の長さの上限値は 60 秒とする。右折信号については右折車線の待ち行列が 3 サイクル連続で 3 台以下にならなかった場合、その方向の点灯時間を 2 秒増加させ、交差方向の右折信号の点灯時間を 2 秒減少させる。この調整法をシミュレータを使い、サイクル長を 100 秒、 L_1 と L_2 のリンク長を 300[m] として適用した。なお直進における待ち行列長の限界値は前節と同様の 50 台とし、右折と

左折車線の待ち行列長の限界値は 25 台とする。また、交通網への流入量は全てのリンクにおいて 1 時間当たり 1500 台とする。これらの条件のもと、シミュレーションを 100 回行った。図 5 はその中で累計車両台数が平均の値をとった時の車両台数のグラフにおいて前半 40 サイクルを示したものである。赤色の実線がリンク L_1 における待ち行列長の推移、青色の実線がリンク L_2 における待ち行列長の推移を表している。制御を行う前は台数が 80 台近く伸びたが制御を行い始めた後は安定した交通流を実現することができた。

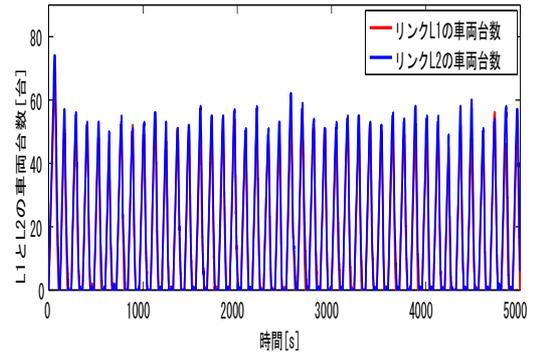


図 5 簡易的な調整法を用いた場合の車両の台数

3.2 制御理論の適用

本章では文献 [2] に習って LQ 最適制御に基づく信号のパラメータの制御を行う。ここまでの設定の下、交通量の保存則によるモデル化からリンク L_1 と L_2 の交通量は次のように表される：

$$l_1(k+1) = l_1(k) + q_1(k) - r_1(k) + w_1(k), \quad (1)$$

$$l_2(k+1) = l_2(k) + q_2(k) - r_2(k) + w_2(k). \quad (2)$$

ここで l_i はリンク L_i の交通量である。また、 $q_i(k)$ は期間 $[kT, (k+1)T]$ におけるリンク L_i への x 方向と y 方向からの合計の流入交通量を表す。 $r_i(k)$ は期間 $[kT, (k+1)T]$ におけるリンク L_i からの流出交通量を指し、リンク L_i からの直進車、左折車、右折車の合計値で表すことができる。また $w_i(k)$ はリンク L_i における外乱を指す。交差点モデルにおける外乱 $w_i(k)$ とはモデル化されていない細い路地からの車両の流入や流出による不確定要素や、モデル化誤差などが該当している。リンク L_i への合計流入交通量 $q_i(k)$ は交差点 $j=1$ と $j=2$ のスプリットに依存して決まる。実際、リンク L_1 と L_2 への合計流入交通量はそれぞれ

$$q_1(k) = 0.25p_3g_{1,3} + 0.5p_5g_{1,1} + 0.25p_7(1 - g_{1,1} - g_{1,2}), \quad (3)$$

$$q_2(k) = 0.25p_9g_{2,3} + 0.5p_{11}g_{2,1} + 0.25p_{13}(1 - g_{2,1} - g_{2,2}). \quad (4)$$

で表される。ここで p_i はリンク L_i における 1 サイクル当たりの飽和交通流、すなわち飽和交通流率とサイクル長の積である。次にリンク L_i からの合計流出交通量 $r_i(k)$ について考える。 $r_i(k)$ も流入量と同様に交差点 $j=1$ と $j=2$ のスプリットに依存して決まる。リンク L_1 と L_2 における合計流出交通量はそれぞれ以下の式で表される。

$$r_1(k) = p_1(g_{1,1} + g_{1,2}), \quad (5)$$

$$r_2(k) = p_2(g_{2,1} + g_{2,2}). \quad (6)$$

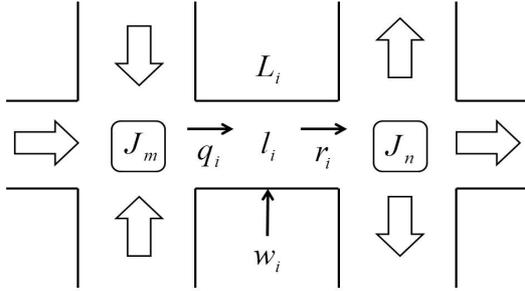


図6 L_i の交通量

$l(k) = (l_1(k) \ l_2(k))^T$ とかいて整理すると

$$l(k+1) = l(k) + Bg(k) + w(k) + c \quad (7)$$

のように表される。 B と c は l, g, w に独立な行列およびベクトルである。ここで平衡点の存在を仮定する。平衡点でのシステムは

$$l^N = l^N + Bg^N + c \quad (8)$$

で与えられる。(2)式から(3)式を引く。 $l(k) - l^N$, $g(k) - g^N$ をそれぞれ状態ベクトル x と入力ベクトル u とすると以下の線形モデルを得る：

$$x(k+1) = x(k) + Bu(k) + w(k). \quad (9)$$

この線形モデルに対して LQ 最適制御の適用を行う。目的は以下に示すような評価関数

$$\sum_{k=0}^{\infty} (x(k)^T Q x(k) + u(k)^T R u(k)) \quad (10)$$

を最小化するような状態フィードバック制御則 $u = -Kx$ を求めることである。ここでの Q, R は重みを表す正定値対称行列である。この目的を達成するために離散時間リッカチ方程式の安定化解 S を算出し、その解を用いてフィードバックゲイン K を導出する。

この手法を用い、条件は前述と同じで実験を行う。この設定の下で式(7)に対応するシステムを求めると以下のようになる：

$$B = \begin{pmatrix} -42 & -69 & 12 \\ -46.5 & -70.5 & 7.5 \end{pmatrix}, \quad c = \begin{pmatrix} 9 \\ 10.5 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

次に平衡点の l^N と g^N の設定を行う。スプリットの平衡点は初期条件に従い、 $g^N = [0.5 \ 0.067 \ 0.375]^T$ と設定する。交通量の平衡点は限界量の半数に当たる $l^N = [45 \ 45]^T$ と設定する。この値は任意に設定可能である。さらに重み行列 Q と R をともに単位行列とし、制御系設計を行う。これらの条件のもとフィードバックゲインを導出し、それを用いて前節と同様にシミュレーションを 100 回行った。図7は其中で累計車両台数が平均の値をとった時の車両台数のグラフのうち前半 40 サイクルを示したものである。LQ 最適制御理論を用いた場合、前節と同様に円滑な交通流を実現させることができた。さらに 100 サイクルでの累計車両台数が 2 割ほど減少しているのが確認できた。このように、簡易的な調整法の場合と比べてさらに円滑な交通流を実現させることができた。

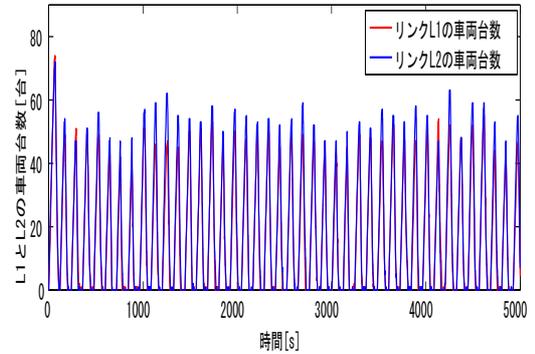


図7 制御理論を用いた場合の車両の台数

4 おわりに

本研究では交通信号のモデル化とそのパラメータ制御法の検証を行った。MATLAB を用いてシミュレータを作成し、結果として上記制御法の有効性の確認を行うことができた。今後の展望として、サイクル長を可変にしスプリットの制御と同時に適切な制御を行うということが挙げられる。さらに道路条件の複雑化に加え、より現実に近い条件を設定し制御を行うことも今後の課題である。

参考文献

- [1] 『改訂 交通信号の手引』。一般社団法人 交通工学研究会，東京，2006。
- [2] 若佐裕治，岩岡浩一郎，花岡健一郎，田中幹也：『実時間広域交通信号制御への制御工学的手法の適用』，計測自動制御学会論文集 Vol42, No9, 1076-1082, 2006。
- [3] 坂倉芳崇：『交通渋滞解消のための信号パラメータ制御』，南山大学数理情報学部 2009 年度卒業論文。
- [4] 川上省吾，松井寛：『交通工学』，森北出版，東京，1992。