

# 交差点における無駄青時間に着目した 信号制御手法の提案

白畑 健<sup>1</sup>・鳥海 梓<sup>2</sup>・大口 敬<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東京大学大学院 工学系研究科 修士課程 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: ken-s@iis.u-tokyo.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東京大学 生産技術研究所 助教 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: azusa@iis.u-tokyo.ac.jp

<sup>3</sup>フェロー 東京大学 生産技術研究所 教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: takog@iis.u-tokyo.ac.jp

従来の交通信号制御は、青を与える動線に着目しており、このために「無駄な青信号」を発生させ、円滑性を低下させてしまう可能性があった。この問題の解決のためには、青を与える動線とともに、あえて赤を与える動線も規定し、全体的な視点から制御することが必要であると考えられる。

本稿では、これを実現するための制御手法の枠組みを提案する。提案手法はあらゆる交差点に対して適用可能で、これを用いることで、無駄青時間を発生させず、安全性や円滑性を確保した新たな信号制御手法の実現が可能となる。

**Key Words :** *traffic signal control, wasted green-time, Intelligent Transport System*

## 1. はじめに

交通信号制御は、交差点で交錯する車や人を空間的・時間的に分離させる<sup>1)</sup>。すなわち、交通信号は交通安全施設である。今後も、平面交差が生じる限り、その制御をいかに行うべきかは大切な問題だろう。

これまで国内外で、多くの信号制御手法が提案されてきた。これらは、基本的に円滑性、つまりより多くの車を流すことを目的とし、与えられた交通に対して「どの動線に、どの程度青を与えるべきか」を求める。それぞれの現示ではできるだけ多くの動線に青を与え、赤を与える動線は青を与えられなかった動線として、結果的に決定される。

さて、この手法は、全体的な円滑性としては十分なのだろうか。というのも、青を与えられた動線のなかには、全体から見ればその重要性が高くないものも含まれている可能性があるからである。重要性が高くないのに青が与えられている状態は「無駄青」と呼ばれ、これを放置すれば、より通すべき動線がその後生じたとしても、そちらを通すことができない。たとえ、その瞬間に切り替えを行ったとしても、黄や全赤といった遷移による損失が発生し、直ちに青を与えられない。

ここでもし、無駄青の動線があらかじめ赤であれば、すぐに必要な青を与えることができたはずだ。どちらが円滑性が高いかは言うまでもない。このように、近視眼的な円滑性のために、相対的に必要性の高くない動線にまで青を与えた結果、全体的にはむしろ円滑性が低下してしまうことがある。

これを防ぐためには、無駄な青をなくす、すなわち、通すことのできる動線すべてに青を与えるのではなく、本当に必要な部分だけに青を与えることが望ましい。そのためには、与えられた交通に対して「どこに赤を与えるべきか」、すなわち止めるべき動線も同時に考える必要がある。これは「通すことは可能であるがあえて止める動線」の存在を意味し、一見必要のない待ちを生み、円滑性を低下させるようにも思えるが、無駄青の発生を抑制し、結果として円滑性の向上につながるといえる。さらに、無駄な青信号を削減し、赤信号の数を多くすることは安全性の点からも都合がよい。

今回は、孤立の信号交差点を対象に、無駄青時間の削減に着目した新たな信号制御手法を考えてゆく。そして、本稿ではその枠組みを提案する。

本稿の構成を以下に示す。まず、第2章で既存の研究を整理する。第3章で、信号制御手法を提案する。第4

章では、その適用例として、いくつかの場合を想定し、そのときの提案手法の挙動を示す。最後の第 5 章では、前章での挙動をまとめ、今後の制御手法の実現に向けて、今後の展望を明らかにする。

## 2. 既存の研究の整理

これまで、国内外で様々な信号制御手法が提案されてきた。本章ではこれらを整理するとともに、安定性の観点から信号制御手法を評価する。これらに基づき、提案手法の方向性を定める。

### (1) 信号制御手法の分類

信号は何らかの入力に対して出力があることで動作するが、「パラメータの出力で間接的に信号を動作させる手法」「状態の出力で直接的に信号を動作させる手法」とその出力の種類で2つに分けられる。

#### a) パラメータに基づいた間接的な制御

センサや観測などから得た統計値を入力として、最適なサイクルやスプリットといった信号制御パラメータを出力、それに基づいて現示を間接的に制御し、信号を動かす。これは、既存のセンサの性能や制御器がタイマーベースで設計されていることを踏まえると、極めて合理的な手法であるといえる<sup>2)</sup>。

Webster<sup>3)</sup>は、交通流のランダム到着を仮定したとき、総遅れを最小にするサイクル長を求めた。これは、交差点の需要率と損失時間から求めることができる。このサイクル長から損失時間を減じ、需要率で按分することで、それぞれの現示の継続時間を定めることができる<sup>4)</sup>。

交差点に設置したセンサから得られた交通をもとに最適な信号制御パラメータを求める手法をいくつか挙げる。浅野ら<sup>5)</sup>では、センサの情報に基づき次のサイクルにおける累積曲線を予測、これによる面積で表される総遅れ時間を最小化するようなパラメータを探し、実行する。岩岡ら<sup>6)</sup>は、時々刻々と変化する交通量を巨視的な交通流シミュレータに入力、総遅れ時間を推定し、最適化を行う。このように、パラメータを用いた制御では、信号制御の問題を組み合わせ最適化問題に帰結させることが可能である。

#### b) 状態量に基づいた直接的な制御

車の位置や速度など、時々刻々と変化する交通の状況をセンシングし、これを入力する。そして、最適な状態を時々刻々と計算して信号灯器の表示を決めて信号を動かす。この手法の提案には ITS の提唱や、近年のセンサ技術などの向上が背景にある<sup>2)</sup>。

加藤らは高度デマンド信号制御方式を提案している<sup>2)</sup>。この方式では、そのときの各車両の位置から、主方向と従方向のそれぞれについて、デマンド評価値と呼ばれる、

「どの程度青を希望するか」を示す指標を算出し比較する。この結果に基づき、1秒単位で表示する信号の灯色を時々刻々と決定する。Varaiya<sup>7)</sup>は“The max pressure (MP) signal control policy”を提案する。ここでは、あらかじめ用意した現示のそれぞれに対して、行列長などに基づき、そのときの“Pressure”を計算する。このとき、“Pressure”が最も大きい現示が最大のスループットを実現するものであり、これを次の現示として選ぶ。

このように、そのときの交通に対して最適な制御を直接的に行うので、信号制御パラメータに基づいた従来の間接的な制御手法よりもより細やかな制御が期待できる。また、交差点の周辺交通の情報のみで動作可能であるので、従来のように中央の制御システムとの通信や人力によるパラメータの調整も不要となり、維持管理コストの低減も可能になる<sup>8)</sup>。

### (2) 信号制御における安定性

和田<sup>9)</sup>は、交通ネットワーク流の安定性における信号制御のパラドクスを述べている。ここでは、単純なネットワークを想定し、青時間比率が固定されている信号制御と各リンクの交通量に応じて青時間比率を調整する、適応的な信号制御のそれぞれについて、安定性を評価している。その結果、青時間比率が固定されている状況では安定均衡状態が存在する一方で、適応的な信号制御においては、均衡状態の唯一性や安定性は保証されない、実際に、容量制約を満たす均衡状態が存在せず、実行不能となる場合が示されている。このように、ドライバの経路選択を考慮せず、近視眼的に状態依存の制御を行うことは、むしろ交通状態の悪化につながる可能性がある。これを解決するためには、経路選択の予測も含んだより高度なシステムを構築する、または交通ネットワーク流の安定化に配慮した制御とすることが必要とされる。

### (3) 提案手法の方向性

より必要などころに青を与えるためには、そのときの交通の状況をセンシングし、動線単位でより細やかな制御を行う必要がある。そのため、パラメータによる間接的な制御ではなく、状態量に基づいた直接的な制御が望ましい。また、今回提案する手法は、近視眼的な制御を行わず、全体的な視点から制御することを前提としているので、前節で挙げたような問題を回避することも可能であると考えられる。

一方で、第 1 章で述べたとおり、いずれの手法も、「青をどの動線に、どの程度与えるか」を求めることはできるが、「赤をどの動線に、どの程度与えるか」についてはあくまでも結果として求まるものである。

以上を踏まえ、① 時々刻々と変化する交通をセンシングし、これを入力する、② 動線ごとに、全体的な視

点から青を与えるべきか、あるいは赤を与えるべきかを決定、③ これに基づき、状態量としての現示を出力するという流れによって、信号を制御するような手法を提案する。

### 3. 手法の提案

#### (1) 交通を検知する

そのときの交通に基づいた制御を行うために、交差点に設置したセンサを用いて、車の存在やその速度などを検知する。制御の根拠となる要素を直接検知できることが望ましいが、理論を援用することで補完可能なものもあるので、必ずしもすべてが検知できる必要はないと考えられる。

#### (2) 動線ごとに望ましい状態を決める

動線に対して、そのタイミングにおいて青を与えるべきか、赤を与えるべきかを決定する。このとき、同時にその状態をどの程度希望するかを希望値として求める。これにおいては、前節で取得した交通や、現在の信号の状態により、評価関数を設け、全体的な視点から統一的な評価を行う。

無駄青の削減という観点からは、例えば青にも関わらず、停止線を通過する交通量がほとんどないような動線は赤を与えるべきである。このような制御を行うためには、評価関数として、現在の信号の状態と交通量を考慮する必要があることになる。

#### (3) 現示の候補を求める

前節で定めた動線の希望を合わせることで、現示の希望を作ることができる。ただし、これにより求められた現示の希望は、動線の交錯関係を考慮していない。つまり、そのまま制御結果として出力すると、実現可能ではない制御を行ってしまう可能性がある。

そこで、実現可能な現示をあらかじめ求めておき、そのなかで希望の現示に適合するものを現示の候補とする必要がある。候補となる現示が完全に希望と適合するとは限らないが、そのすべてが実現可能なものである。

##### a) 動線交錯の考慮

希望とは別に実現可能な現示を求める。このとき、最初に実現可能性を考慮せず、すべての現示を動線単位から列挙し（これを「評価すべき現示」と呼ぶこととする）、それぞれに対して実現可能性を評価する方法を行う。

まず、動線単位で考えると、状態量として、青か赤か2通りの場合が考えられる。動線の数 $n$ のとき、これが全てにおいて独立に成り立つ。したがって、評価すべき現示としては、 $2^n$ だけ列挙することができる。なお、

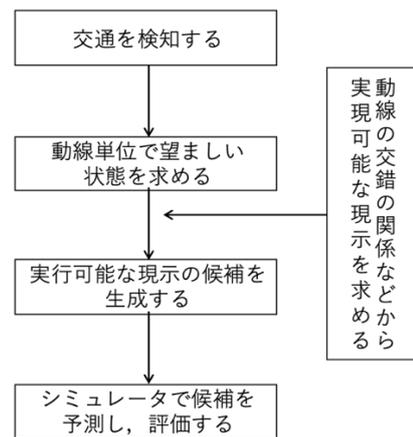


図-1 提案手法の流れ

信号の状態は、停止線を進むことができる（青）か否か（赤）のどちらかであり、ここに黄は存在しない。黄はあくまでも青から赤へ遷移するための補助的な灯火であるからだ。

次に、求めた現示それぞれについて、実現可能性を評価する。このとき、異なる2つの動線の交錯関係を示した表を用いることで機械的に評価を行うことができる。さらに、矢印の有無など、信号機の制御方法によって、実現可能な現示に制約が生じることもある。

##### b) 適合度の計算

前項により求められた実現可能な現示のそれぞれに対し、前節で求めた現示の希望と比較し、その適合の度合いを評価する。このとき、単に当てはまり具合を評価するだけでなく、希望値も考慮に入れる。例えば、現示の希望が実現されている場合は、希望値を正の値として、実現されていない場合は負の値として計算し、これを動線単位でそれぞれ求めた結果を現示単位で合算したものを、適合度とする、といった方法が考えられる。

最後に、適合度の大きいものから順位づけを行う。順位が高いものほど、動線の交錯を生じないで、希望をより実現している現示になる。そして、この上位のいくつかを次の現示の候補とする。

#### (4) 候補を評価する

前節において、適合度の最も大きいものを次の現示として出力することも可能であるが、実際の交通における不安定性や、現示間の遷移まで評価に含めるのであれば、適合度の上位のいくつかを実行した結果を予測することが望ましい。今回は、交通がある程度検知されていることを前提としているので、評価する現示の候補の数だけマイクロシミュレータを起動、取得した交通とそれぞれの候補を入力し、一定の時間まで予測および評価を行う。これにより、よりよい制御の実現が可能になる。

そして、最終的に実行する現示を決定する。

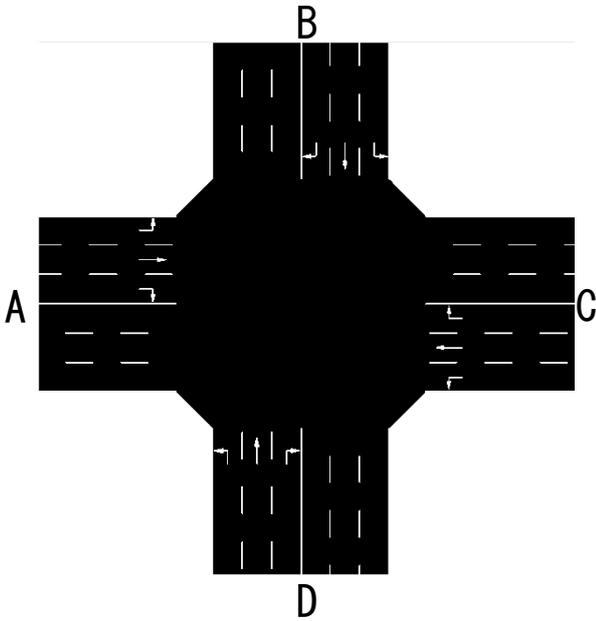


図-2 4方向3車線流入の交差点

表-1 12の動線をもつ交差点の交錯関係

	AB	AC	AD	BC	BD	BA	CD	CA	CB	DA	DB	DC
AB	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
AC	○	○	○	×	×	○	○	○	○	×	○	○
AD	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×	×	○
BC	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
BD	○	×	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○
BA	○	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○
CD	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
CA	○	○	○	×	○	○	○	○	×	×	○	○
CB	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	×	○
DA	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
DB	○	×	×	○	○	○	○	×	○	○	○	○
DC	○	○	×	○	○	○	○	×	×	○	○	○

#### 4. 手法の適用例

前章で提案した手法のうち、① 動線交錯を反映させた、実現可能な現示を求める段階、② 適合度を計算する段階について、(1)4方向3車線流入（全方向矢印あり）、(2)4方向1車線流入（矢印なし）、(3)4方向1または2車線流入（右矢あり）、(4)3方向1または2車線流入と、複数の場合を想定して、適用例を示す。

##### (1) 4方向3車線流入（全方向矢印あり）

図-2のような交差点において、それぞれの流入路に対して、各動線を個別に制御できる矢印のついた信号機が設置されている場合を考える。なお、アルファベットは流入路の名称である。

このとき、動線の数はいずれの流入部でも3であり、それが4方向あるので、合計12である。したがって、評価すべ

表-2 想定する現示と適合度

	AB	AC	AD	BC	BD	BA	CD	CA	CB	DA	DB	DC
希望	青	青	赤	赤	青	赤	青	青	赤	赤	青	青
希望値	20	40	30	60	30	70	20	40	50	30	40	20
現示	青	青	赤	赤	赤	赤	青	青	赤	赤	赤	赤
適合度	20	20	30	60	-30	70	20	40	50	30	-40	-20
計												
250												

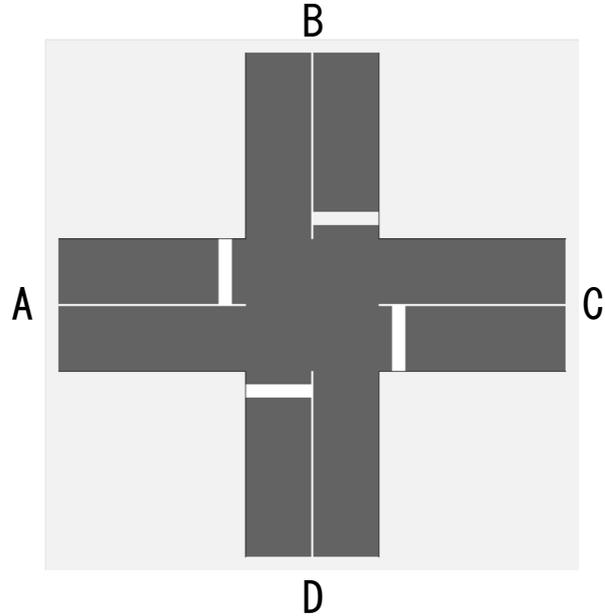


図-3 4方向1車線流入の交差点

き現示の数は、 $2^{12} = 4096$ 通りとなる。これに対し、動線交錯を考慮し、実現可能な現示を、交錯関係を示した表（表-1）に基づいて求める。ここで、表のアルファベットは流入路に対応する。動線はアルファベット2文字で記述され、1文字目が起点、2文字目が終点である。動線の交錯関係は、対応する行と列の交差する部分にそれぞれ示される。○は実現が許容されている動線、×は許容されない動線を表す。

この結果、実現可能な現示は560通りと求めることができる。

次に、適合度を計算する。ここで、ある現示の適合度は以下のように計算できる。

- ① 希望の現示と比較を行う
- ② 適合するところは希望値を正の値で与える
- ③ 適合しないところは希望値を負の値で与える
- ④ それぞれの動線で定まった符号付きの希望値を合計し、これを適合度とする

今回、希望の現示と評価する現示を表-2のように定めたとき、その適合度は250と計算できる。

表-3 信号の表示と動線の状態の関係(1)

	左	直	右	表示
状態1	青	青	青	青丸
状態2	赤	赤	赤	赤丸
状態3	赤	赤	青	赤丸+右矢



図4 3方向2車線流入の交差点

(2) 4 方向 1 車線流入 (矢印なし)

図-3のような交差点において、それぞれの流入路に対して、矢印のない信号が設置されている場合を考える。

前節と同様、評価すべき現示の数は、 $2^{12}=4096$  通りとなり、動線の交錯を考慮した実現可能な現示は 560 通りである。一方、今回は 1 車線流入で、それぞれの流入路で、左折・直進・右折の 3 つの動線が一括して制御される。つまり、560 通りのうち、各流入路で、3 つの動線の青または赤が同じであるもののみが実現可能である。この結果、最終的な実現可能な現示の数は 7 と求めることができる。

適合度に関しては、前節と同様に計算することができる。

(3) 4 方向 2 車線流入 (全流入路に右矢あり)

図-3のような交差点において、それぞれの流入路に対して、右折専用車線と右矢が取り付けられた信号が設置されている場合を考える。

前節までと同様、評価すべき現示の数は、 $2^{12}=4096$  通りとなり、動線の交錯を考慮した実現可能な現示は 560 通りである。一方、今回は 2 車線流入で、それぞれの流入路で右矢が取り付けられている。このとき、左折・直

表-4 6の動線をもつ交差点の交錯関係

	AB	AC	BC	BA	CA	CB
AB		○	○	○	○	×
AC	○		×	×	○	×
BC	○	×		○	○	○
BA	○	×	○		○	○
CA	○	○	○	○		○
CB	×	×	○	○	○	

表-5 信号の表示と動線の状態の関係(2)

	直	右	表示
状態1	青	青	青丸
状態2	赤	赤	赤丸
状態3	赤	青	赤丸+右矢

進・右折の 3 つの動線は、一括して、または、右折のみが独立して制御される。実際に実現する信号の表示を流入路別に動線単位の状態として表すと、表-3のようになる。つまり、560 通りのうち、各流入路で、動線の状態がこの組み合わせを満たすもののみが実現可能である。例えば、左折と右折が赤で直進が青という組み合わせは実現できない。この結果、最終的な実現可能な現示の数は 17 と求めることができる。

適合度に関しては、前節までと同様に計算することができる。

(4) 3 方向 2 車線流入 (B のみ右矢あり)

図-4のような交差点において、Bの流入路に対してのみ、右矢のある信号が設置されている場合を考える。

このとき、動線の数は各流入部で 2 であり、それが 3 方向あるので、合計 6 である。したがって、評価すべき現示の数は、 $2^6=64$  通りとなる。交錯関係を示した表は、表-4のようになり、動線の交錯を考慮した実現可能な現示は 28 通りである。そして、信号機の制御方法を考慮する。AとCの流入路は、矢印をもたないので、それぞれで動線は一括して制御される。右矢をもつBの流入路で実現可能な動線の状態の組み合わせは表-5のように表現される。28 通りのうち、これに適合するものが、最終的な実現可能な現示であり、この数は 7 通りと求めることができる。

適合度に関しては、前節までと同様に計算することができる。

本章を通し、提案手法はあらゆる種類の信号交差点に適用可能であることが明らかである。これは本手法において、交差点を動線の集合として扱っているためである。

## 5. おわりに

本稿では、「無駄青」の削減を目的に、従来注目されてきた「青にするべき動線」だけでなく、「赤にするべき動線」も求め、全体的な視点に基づいた、信号制御手法の枠組みを提案した。提案手法では、検知した交通に基づき、評価関数を適切に定めることで、動線ごとに青にするべきかだけでなく、赤にするべきかを決定可能である。これにより、たとえ青にすることができる動線であっても、積極的に赤にする選択肢が生まれ、無駄青の削減が可能となる。また、提案手法により得られる現示は、動線交錯を考慮したうえで、望ましいとされる現示を最大限に実現できるもので、これにより安全性と円滑性が確保された制御を行うことができる。

また、適用例に示したように、本手法はあらゆる交差点に当てはめることができる点も特徴である。これは、提案手法の実装を促進する点で利点となりうる。

今後は、提案手法をシミュレータ上などで実装しつつ、制御に必要な評価関数や希望値の検討などを行う予定である。そして、本手法に基づいた信号制御が実現した折には、その性能を評価していければと考えている。

## 参考文献

- 1) 大口 敬：多車線交差点における信号制御技術，交通工学, Vol. 44, No. 3, pp. 4-9, 2009.
- 2) 麻生敏正，長谷川孝明：全自動高度デマンド信号制御 II 方式，電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J93-A, No. 8, pp. 544-554, 2010.
- 3) F. V. Webster and B. M. Cobbe : Traffic Signals, Road Research Technical Paper, No.56, Her Majesty's Stationery Office, London, 1966.
- 4) 一般社団法人 交通工学研究会:平面交差の計画と設計基礎編 -計画・設計・交通信号制御の手引-, 丸善出版株式会社, 2018.
- 5) 浅野美帆，中島章，堀口良太，小根山裕之，桑原雅夫，越 正毅，赤羽弘和:遅れ時間自己評価によるリアルタイム交通信号制御，土木計画学研究・論文集, Vol. 20, No. 4, pp. 879-886, 2003.
- 6) 岩岡浩一郎・織田利彦:リアルタイム交通信号最適化制御，土木計画学研究・講演集, Vol. 25, 2002.
- 7) Pravin Varaiya: Max pressure control of a network of signalized intersections, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 36, pp. 177-195, 2013.
- 8) 白畑 健・伊藤昌毅・新倉 聡・大口 敬:車両到着センサを想定した自律型信号制御ロジックの提案，第 17 回 ITS シンポジウム 2019, 2019.
- 9) 和田健太郎: 交通ネットワーク流の安定性と制御，計測と制御, Vol. 55, No. 4, 2016.

(???? ?? ?? 受付)

## A Proposal of the Traffic Signal Control Method Focused on the Wasted Green-time

Ken SHIRAHATA, Azusa TORIUMI and Takashi OGUCHI

In the world, a lot of methods for traffic signal control have been proposed. They typically tell us which movements we should give green. However, this can cause “the wasted green-time,” which decreases the efficiency of traffic.

In this paper, we propose the framework of the completely new method of traffic signal control. The proposed method tells us which movements we should give red, as well as green. Moreover, we can apply the proposed method to a variety of intersections.

By developing the proposed method, we could avoid “the wasted green-time” at every intersection.