

十字路単独交差点における 自律分散型信号制御の特性評価

白畑 健¹・伊藤 昌毅²・鳥海 梓³・新倉 聡⁴・大口 敬⁵

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

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

²正会員 東京大学大学院 情報理工学系研究科附属ソーシャル ICT 研究センター 准教授 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

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

³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

⁴非会員 公益財団法人 日本道路交通情報センター (〒 102-0072 東京都千代田区飯田橋 1-5-10)

E-mail: niikura@pluto.dti.ne.jp

⁵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

車両検知に基づく信号制御では、通行権の組合せの限定や表示順序の固定を前提に、将来到着する交通需要の予測を伴うことが多い。一方で筆者らは、交錯が許容される組合せすべてを順序を定めずに扱い、検知した車両から評価できる近い未来までの交通状況のみに基づき信号を切り替える「自律分散型信号制御」を提案、一定の性能を有することを示している。本稿では、提案制御を十字路単独交差点に適用させることを考え、その制御設計手順の整理やマイクロ交通シミュレータを活用した実験による検討に取り組む。そして、検討から得られた内容から提案制御の特性を評価する。その結果、提案制御の特性として、制御設計において交通状況の期待値的な評価が不要になることや、制御の制約条件に関わらず共通のロジックをあてはめられることが明らかになった。

Key Words: 交通信号制御, 交通流モニタリング, 交通シミュレーション, ITS

1. 本稿の課題意識

交通信号制御は、交差点を通過する各動線に対して通行権を時間帯別に与えることで、空間的に交錯し得る動線を時間的に分離する¹⁾。このとき、交差点に到着する交通に対して通行権を適切に配分することを目的として、交差点周囲に設置した車両感知器や車両との通信の活用のもとに、交差点に到着する交通流の情報のモニタリングを行い、得られた情報に基づいて信号を制御する方法が提案されており、これらは交通応答制御 (Adaptive Signal Control) と呼ばれている²⁾。

この制御として、車両感知器で取得した情報に基づき、「現在の現示 (同時に与えられている通行権の組み合わせ) をそのまま継続するか」「現在の現示を終了して別の現示に切り替えるか」のどちらかを、数秒のごく短い一定の時間間隔で逐次判断する方法がある。これは、Binary Choice Approach と分類され³⁾、現在から次の判断のタイミングまでに至る比較的近い時間の切り替えを決定することになる。例えば Miller⁴⁾ は、現在の現示を 2~10 秒後まで 2 秒単位で延長する場合と直ちに終了する場合から選択する方法を、Bang⁵⁾ は h 秒後 (e.g.; $h = 1$) まで延長する場合と直ちに終了する場合から選択する方法 (Traffic Optimization Logic; TOL)

を提案している。また、Binary Choice Approach とは別に、Sequencing Approach と分類される方法も提案されている³⁾。これは Switching Sequence という H 秒間 (e.g.; $H = 50 \sim 100$) の比較的長い時間を考え、車両感知器で取得した情報に基づいて、その期間における信号の切り替えのタイミングを決定するものである。例えば、Gartner⁶⁾ の OPAC (Optimization Policies for Adaptive Control) では、Rolling Horizon Scheme と呼ばれる方法が提案されている。この方法では、① H 秒間の Switching Sequence を k の要素に分割し、この要素単位で各動線への通行権を割り当て、 H 秒間にわたって信号の切り替えを決定する、② 決定に従い信号を切り替えていく、③ k の要素のうち r 番目の要素に到達した時点で、再び、その時点からさらに H 秒先までの信号の切り替えを同様に決定する、という一連の流れを繰り返すことで順次信号を切り替える。また、岩岡ら⁷⁾ や久井ら⁸⁾、浅野ら⁹⁾ は、車両感知器で検知した結果に基づいて、最適なサイクル長やスプリットを算出する方法を提案している。これらについても、サイクル長を H 秒間の Switching Sequence としてその間の切り替えを決定するという点から、Sequencing Approach のひとつと考えることができる。さらに、Zheng ら¹⁰⁾ は、交錯の生じない動線同士で通行権を与えるタイミングを独立に設定する考え方

である, Dual Ring を前提とした, Sequencing Approach による方法を提案している。

このように, 車両感知器から得られたデータに基づいて信号を適切に切り替えようとする試みは長きにわたり, さまざまな方法で取り組まれている。一方で, 筆者らは, 次の 2 つの点において議論すべき点があると考えている。

① 通行権の組合せの限定や表示順序の固定

信号制御の典型的な方法では, 複数考えられる通行権の組合せのうち, 交錯が生じない, または交錯が許容されるものの一部を「現示」としてあらかじめ定める。ここで, 東西南北に 4 つの流入部をもつ十字路交差点を考えると, 通行権の組合せは複数想定される。しかしながら, そのうちの一部, 例えば, 東西方向に通行権を与えるもの(現示 1)と南北方向に通行権を与えるもの(現示 2)の 2 つのみなどを, 「現示」として限定的に与えるということである。また, この「現示」に対して, 表示する順序を事前に設定することもある。例えば, 上で挙げた十字路交差点で, 南北方向の交通に対する右折専用現示(現示 3)を加えた 3 現示制御とすると, 「現示 1 → 現示 2 → 現示 3 → 現示 1 → …」などと, 現示の切り替え順序を常に固定されたものとする。

このとき, 信号の切り替えは現示として定めた範囲内のみで行われるという制約が生じる。そのため, 交通状況によっては必ずしも柔軟な切り替えができない場合がある。また, 通行権の組合せや表示順序を適切に定めるための方法が理論的に確立されているわけではないため, これらの設計においては経験に頼らざるを得ないといえる。

なお, 上で挙げた現示の固定化による制御は特に我が国において用いられている¹¹⁾。一方で, このような固定をある程度緩和し, 交錯が生じない範囲内で動線(ムーブメント)別に独立して通行権を与える「ムーブメント制御」の考え方も提案されており, ドイツなどで用いられている¹²⁾。

② 一定時間将来の交通需要予測

信号制御によって生じる「遅れ」などの影響は, あくまでも制御の結果として得られるものであり, これの評価には推定を伴う。一方で, 交差点上流の数十 m 先に設置した車両感知器によって取得したデータそのものから直接的に推定できるのは, せいぜい十数秒先のごく近い未来のみである。数十秒, 数分先のより遠い将来を推定するためには, 車両感知器には直接的に検知されていないものの, 今後到着することが期待される交通需要を予測する必要がある¹³⁾。

より遠い将来を考慮して信号制御を行うことは, 近

視眼的な制御を避けるという点で, 一見すると望ましい可能性がある。しかしながら, さまざまな要因で時々刻々と変化する交通状況において, 将来の予測結果が常に当たる保証はなく, 遠い将来の交通需要を予測することが必ずしも妥当な結果をもたらすとは限らない³⁾。

交通流のモニタリングによる信号制御としてこれまでに提案されている方法では, これら 2 つのいずれか, あるいは両方を伴っているといえる。まず, Binary Choice Approach に分類されるものについては, 比較的近い時間の将来推定に基づいており, ②は必要としないものの, あらかじめ設定された「現示」を前提とするため, ①に当てはまる。そして, Sequencing Approach に分類されるものについては, 数十秒から数分先の比較的長い時間にわたって信号の切り替えを決定するため, ②のような将来の交通需要予測が必要となる。特に最適なサイクル長やスプリットを決定する方法は, 通行権の組合せや順番の存在を前提とし, その表示時間を調整するという考え方であるため, ①についても当てはまっていることになる。

今後, 車両感知器や車両との通信などを活用した交通流のモニタリングに基づく信号制御をより適切なものとするためには, 上に挙げた 2 つの論点に着目した検討を進めることに価値があるといえる。

2. 本稿に関連する一連の研究

前章で挙げた 2 つの論点に対して, 筆者らは「自律分散型信号制御」を提案し, ミクロ交通シミュレータへの実装および性能評価を行っている¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。本章では, これまでの取り組みを整理し, また一連の研究における本稿の位置づけを明確にすることを目的に, 「自律分散型信号制御」に関する研究の枠組みを説明する。

(1) 研究の概要

前章で述べたような課題意識に対して, 筆者らは「交通流モニタリングから得られる確定的情報に基づく信号制御」の検討を進めている。これは, 車両感知器や車両との通信に基づく交通流のモニタリングを行うことを前提に, 比較的遠い将来におよぶ需要予測などを行うのではなく, 交差点周囲から得ることのできる, 比較的近い未来に起こることが確実である情報, すなわち「確定的情報」のみに基づいて, 適切な信号の切り替えを目指す試みである。このとき, 次の 3 点の課題について検討することが必要になると筆者らは考えている。

① 交通流モニタリング技術の開発

各者を個別的・明示的に考慮した信号制御を実現するために, センサによる制御対象のモニタリングを前提とする。そのためのセンシング技術, セ

ンシングで得た情報から交通の状況を把握して推定する方法などを開発する。

② 基本となる制御ロジックの確立

シンプルかつ、あらゆる場面に適用できる拡張性を持つ基本の「制御ロジック」を構築する。

③ あらゆる場面を想定した制御の考え方の体系化

制御ロジックをそれぞれの場面に適用させるうえで、制御の制約条件や目的関数などの適切な考え方を整理し、体系づける。また制御ロジックを適用できる・適用することが望ましい場面、あるいは適用できない・適用することが望ましくない場面、といった適用範囲を明らかにする。

(2) 研究の位置づけ

前節で述べた課題意識のもと、筆者らによるこれまでの研究内容、そして本稿で扱う内容の位置づけを説明する。

まず、白畑ら (2020-1)¹⁴⁾において、②にあたる基本の制御ロジックとして、本稿における「自律分散型信号制御」の概念を提案した。また、①に対応する内容として、モニタリングにより得られた車両軌跡データから、目的関数のひとつとして想定される「遅れ」を、マイクロ交通シミュレータにより推定する方法をまとめた。次に、②で提案した制御ロジックに対して、適当な制約条件と目的関数の設定のうえに、制御ロジックの性能を評価するための基礎的な検討を行った。白畑ら (2020-1)¹⁴⁾では、実際に信号交差点で観測した交通量データを用いて、白畑ら (2020-2)¹⁵⁾では、交通需要の大きさの異なる、複数の交通需要条件を用意して、信号制御がもたらした遅れなどをマイクロ交通シミュレータ上で評価した。さらに、白畑ら (2021)¹⁶⁾では、交通需要の大きさに加えて右折車混入率の異なる場合も想定して評価実験を繰り返すとともに、実験結果が得られたメカニズムについて、信号灯火の切り替わりのようすや各車両の軌跡に着目して考察を行い、提案する制御が一定の性能を有することを示した。

このように、これまでの一連の研究によって、②に対応する、基本となる制御ロジックの流れやその基礎的な性能についての検討は、一定の成果を挙げられている状況であり、また、①における、交通流モニタリング技術についても、より現実のセンシング環境を考慮した検討を進めている状況である。

しかしながら、③に対応する、さまざまな場面に対して提案制御をどのように適用できるのか、また、どのような制御結果をもたらすのか、そして、どのような考え方が求められるのかを整理し、制御の適用範囲を明らかにして妥当性を示していく点においては、今後、あらゆる場面を想定した実験を繰り返して、継続的な検討に取り組むことが必要になるといえる。

このとき、筆者らは、まず単独の交差点を対象として検討を行うことが望ましいと考えている。これは、提案制御はあくまでも「交差点周囲」という局地的な情報に基づく制御であるためである。

一方で、たとえ単独の交差点で柔軟かつ適切な信号制御を実現したとしても、複数の信号交差点を考えたときに、その全体としても適切な制御となっているとは限らない。そのため、隣接する信号交差点、複数の信号交差点が連続する路線、信号交差点を含む街路が面的に広がっていく場合と徐々に検討する範囲を大きくしたときに、あくまでも「交差点周囲」の局地的な情報に基づく提案制御をどのように適用させていくのかを検討することも、また重要であると考えている。

そこで、本稿および今回の発表では、③に関する検討として、まずは、単独交差点を、また典型的な幾何形状として十字路交差点を考え、それに提案制御を適用させるための制御設計の手順の整理を行うとともに、マイクロ交通シミュレータを活用した実験に取り組む。これらの検討から得られた内容に基づいて提案制御の特性を分析し、提案制御が有利・不利となる条件や、制御の考え方として求められる要件を考察する。そして、これらの内容をまとめ、提案制御の妥当性を議論できればと考えている。

これらを踏まえ、本稿の構成を以下の通りに示す。第3章では、筆者らが提案する「制御ロジック」¹⁶⁾を改めて説明する。第4章では、十字路交差点に対して提案制御を適用させることを想定し、実際の制御設計の流れをたどるとともに、マイクロ交通シミュレータを用いた評価実験を行う。第5章では、前章までの検討に基づいて、提案制御のもつ特性を評価する。第6章では、本稿の内容をまとめ、今回の発表に向けた展望を述べる。

3. 制御ロジック¹⁶⁾

白畑ら (2021)¹⁶⁾でまとめられている提案ロジックの概要について、ここで改めて説明する。

(1) ロジックの特徴

第2章で挙げた「基本となる制御ロジック」は、第1章で挙げた論点に対応する、以下の特徴を有するものとして提案されている。

検知した車両の個別の軌跡に着目した交通現象評価

提案ロジックでは、車両感知器で実際に検知した車両のみに着目し、個別の軌跡に基づいて交通現象を評価する。このとき、将来の交通需要予測を行わず、比較的近い未来のみを推定することになる。

実現可能な組合せの全列挙に基づく逐次判断

比較的近い未来の推定を前提とするとき、切り替

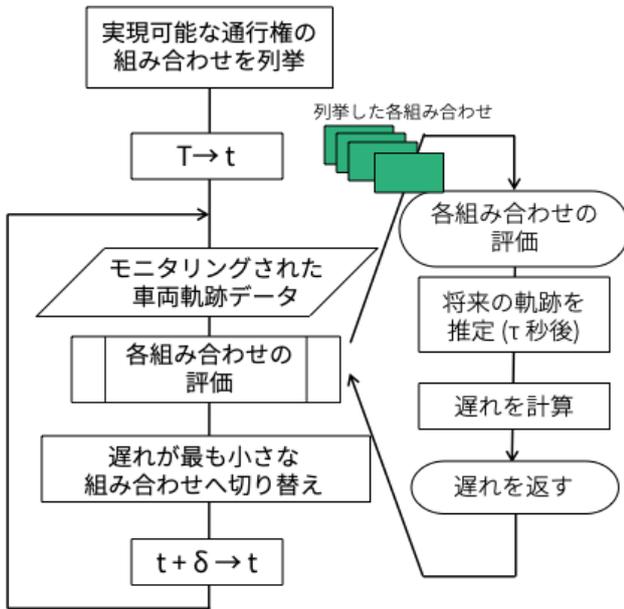


図-1 提案ロジックの流れ¹⁶⁾

えを決定することができるのは、判断のタイミングからごく近い未来までに限られる。そこで、比較的短い時間間隔 (δ 秒) で、近い未来 (τ 秒後) の推定に基づいて、信号の切り替えを逐次に決定していく。ここで、提案ロジックでは、交錯が生じない、あるいは許容される、つまり実現可能な通行権の組合せをあらかじめ列挙し、それらのすべてを切り替え可能な選択肢と定める。実現可能な組み合わせの一部のみを「現示」として規定し、現示切り替えの順序を固定とする既存の方法と比べると、切り替えの選択肢が複数存在し得る点、切り替えの順番も固定されていない点が異なる。

(2) ロジックの流れ

図 1 は、提案ロジックによって信号の切り替えを判断する流れを示している。まず、動線交錯の制約条件に基づいて、実現可能な通行権の組合せのすべてを列挙しておく。そして、車両感知器によって得られた車両軌跡データに基づいて、列挙した組み合わせに信号を切り替えたときに各車両が被る遅れを求め、これが最も小さくなる組み合わせへ逐次切り替えを行う。

さて、提案ロジックでは、 δ 秒の頻度で信号の切り替えの判断が行われる。ここで、切り替え判断の時間間隔 δ の長さは、ある通行権の組合せからある組合せへ切り替えるときに必要となる時間長と、切り替えの判断を行う頻度の設定値である「単位判断時間間隔」の 2 つによって決定する。提案するロジックにおいて、特に前者は黄信号表示時間長に相当する。したがって、どの組合せからどの組合せに切り替えが行われるのかによって、その長さは変化する。ここで、前者を δ_1 、後

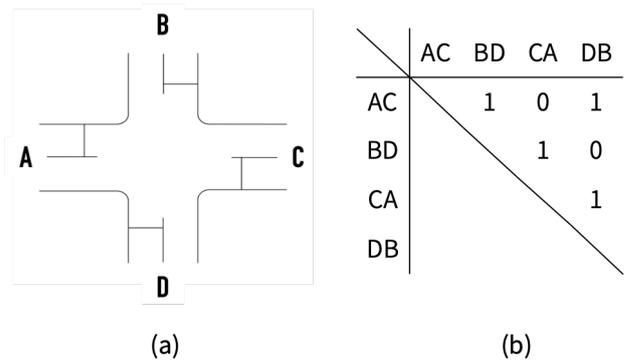


図-2 4 枝 1 車線流入部の交差点での動線交錯の一例¹⁶⁾

者を δ_2 と定めると、切り替え判断の時間間隔 δ は、両者の和として与えられる。

(3) 実現可能な組合せの列挙

提案ロジックでは、実現可能な通行権の組合せをあらかじめ列挙する必要がある。ここでは、動線交錯の制約条件を定義し、実現可能な組合せを求めるまでの流れとその例を述べる。

a) 列挙の流れ

① 動線交錯の制約条件を定義する

どのような動線交錯を許容するか、あるいは許容しないかを定義する。例えば、動線同士が「直交」するものを許容しない交錯として、このような動線の交錯が存在するような通行権の組合せを認めない (信号灯火として表示しない)、などと定める。

② 交錯関係を整理する

動線の交錯関係を整理する。動線の交錯とは、異なる 2 つの動線の関係性によって生じるので、これらの関係性を記述することで制約条件を表現できる。ここでは、図 2(a) のような 1 車線の流入部 (A・B・C・D) を有する 4 枝の交差点を例に考える。右左折や転回 (U ターン) を想定せず、各流入部で直進の動線のみを考え、X から Y に進む動線を XY と表すことにする。この場合ならば、AC・BD・CA・DB の 4 つの動線がある。そして、動線同士が「直交」するものを許容しない交錯と定め、動線同士が直交するものを 1、直交しないものを 0 として図 2(b) のように関係性を整理する。例えば、動線 AB と BD は直交するので対応するマスは 1、動線 AB と CA は直交しないので 0 となる。

③ 交錯を考慮せずに組合せを列挙する

交差点単位で考えることができる通行権の組合せを求める。交差点の各動線における通行権は、信号灯火の青 (通行権が与えられている) と赤 (与えられていない) に対応する。 n ($n = 1, 2, 3, \dots$)

の流入路および信号灯で構成される交差点の場合、考えることができる通行権の組合せの総数は、各信号灯で青か赤のどちらかを割り当てて組み合わせさせた 2^n 通りである。図 2(a) の場合ならば、それぞれの流入部が 1 車線であるので、流入路の数 $n = 4$ として、16 通りとなる。

④ 制約条件を満足するものを探す

定義した制約条件を参照しながら、 2^n ある通行権の組合せのそれぞれで生じる交錯部分（交錯を許容しない動線同士が互いに交わる部分）の数を求めることで、実行可能な通行権の組合せを調べる。それぞれの組合せで生じる交錯部分の総数 C を次の式 1 で求めることができる。

$$C = \vec{s}^T F \vec{s} \quad (1)$$

ここで、 \vec{s} は、動線ごとの通行権を示したベクトルで、通行権が与えられているものを 1、与えられていないものを 0 として表す。 F は、動線同士の交錯関係を定義した図 2(b) に対応した行列である。図 2(b) の i 行 j 列のマスを m_{ij} と表したとき、行列 F の対応する要素 f_{ij} は以下のようになる。

$$f_{ij} = \begin{cases} m_{ij} & i < j \text{ のとき} \\ 0 & i \geq j \text{ のとき} \end{cases} \quad (2)$$

そして、 2^n の組合せのうち、交錯部分の総数 C がゼロであるものを、制約を満足した組合せとして求めることができる。

まず、図 2(b) の各要素を行列として表すと、

$$F = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

となる。

図 2(a) の動線 AC および CA に通行権が与えられている場合の交錯部分の総数 C を計算してみる。これをベクトル \vec{s} として表すと、

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} \text{動線 AC の通行権} \\ \text{動線 BD の通行権} \\ \text{動線 CA の通行権} \\ \text{動線 DB の通行権} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

となる。このとき、交錯部分の総数 $C = 0$ であり、制約を満たした組合せとして求めることができる。一方で、図 2(a) の動線 AC および CA、DB に通行権が与えられている場合の交錯部分の総数 C を計算してみる。これをベクトル \vec{s} として表すと、

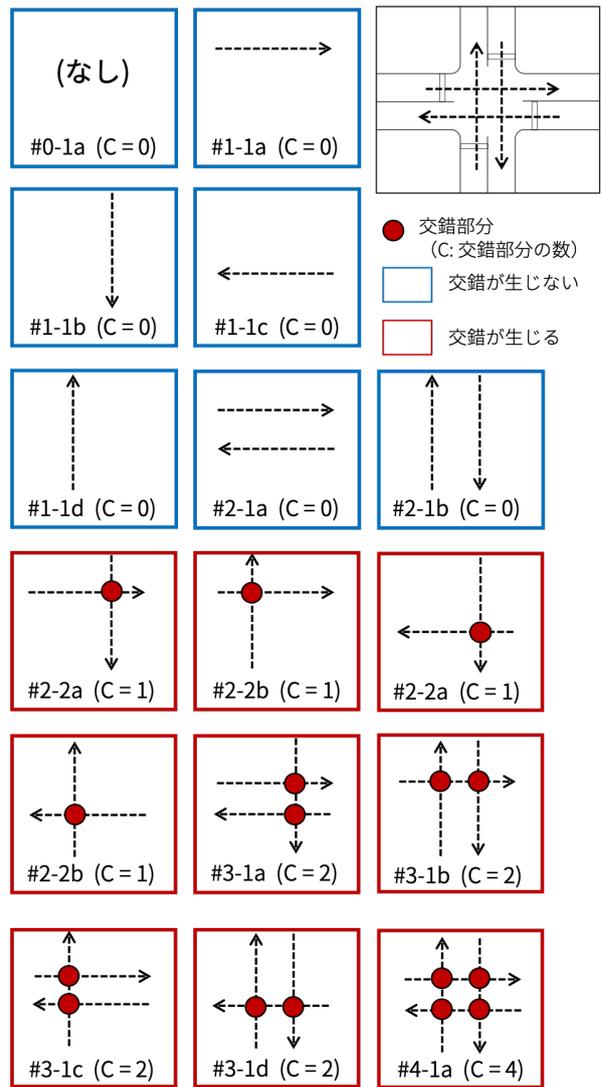


図-3 4 枝 1 車線流入部交差点で実現可能な組合せの列挙¹⁶⁾

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} \text{動線 AC の通行権} \\ \text{動線 BD の通行権} \\ \text{動線 CA の通行権} \\ \text{動線 DB の通行権} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

となる。このとき、交錯部分の総数 $C = 2$ であり、交錯が 2 か所で生じて実現可能でない組合せであるとして求めることができる。

b) 計算例

図 2 における他の組合せでも同様に計算し、16 通りの組合せとその交錯部分（図中の赤丸印）の総数 C を示したものが図 3 である。青枠の 7 通りは動線の交錯がなく、赤枠の 9 通りは交錯が生じることから、前者を実現可能な通行権の組合せとして列挙できる。

これらの組合せの内訳について、まず、いずれの動線にも通行権を与えない組合せが 1 通りある (#0-1a)。また、通行権を与えられた動線の数 n が 1 のものが、交

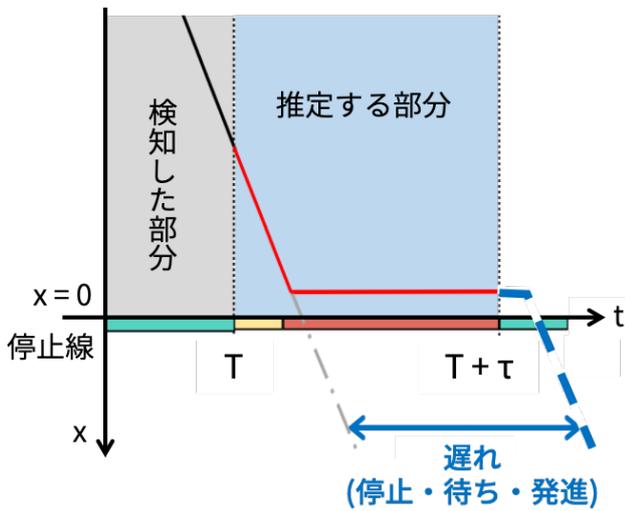


図-4 軌跡データに基づく遅れの推定¹⁶⁾

差点における動線の数と同じだけ、つまり 4 通りある (#1-1a から #1-1d)。そして、2 つの動線に通行権が与えられる場合は、2 つの場合が考えられる。ひとつめが、互いに対向する動線同士の組合せであり、実行可能なものとして左右方向と上下方向の 2 通りがある (#2-1a と #2-1b)。もうひとつが、互いに直交する動線同士の組合せで実行可能ではない (#2-2a と #2-2b)。通行権を与えられた動線の数が 3 以上で実行可能なものは存在しない (#3-1a から #3-1d、および #4-1a)。

(4) 車両軌跡データに基づいた遅れの計算

提案ロジックでは、車両感知器による検知の結果得られた車両軌跡データを活用することで、信号の切り替えによる影響を評価する。具体的には、それぞれの組合せに切り替えが生じたときの各車両の挙動を「近未来推定時間長」の τ 秒後まで推定し、それに基づいて、切り替えの結果として発生する遅れの値を求める。提案ロジックでは、マイクロ交通シミュレータを用いることで、各車両の軌跡を推定する。このとき、各車両の挙動は追従タイプのモデルにより記述され、車両ごとに設定された運転挙動に関するパラメータに基づいて、車線上を走行する¹⁸⁾。

ここでは、検知および推定した車両軌跡データから遅れを計算する方法を説明する。図 4 は、時刻 $t = T$ の切り替えによって青信号から赤信号へ切り替わる場合に、ある車両の軌跡を $t = T$ から $t = T + \tau$ まで推定して遅れを求めるまでの流れを概念的に示したものである。ここで、黒線部分が検知によって得られた軌跡で、赤線部分が推定する軌跡である。

今回の例では、まず、車両は赤信号によって停止線の手前で減速して停止する。このとき、赤信号は少なくとも次の判断のタイミングである $t = T + \delta$ まで継

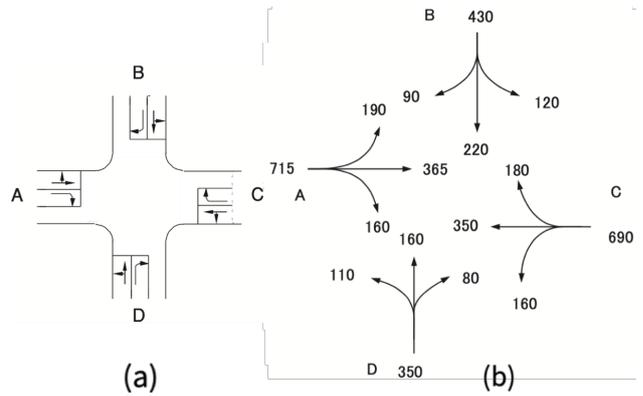


図-5 交差点の幾何構造と設計時間交通量 (台/時)

続することは確実である一方で、その後の切り替わりについては $t = T$ の時点では決定していない。そこで提案ロジックでは、 τ 秒後まで赤信号表示が継続し、さらに $t = T + \tau$ において青信号表示に切り替わる判断が行われるものと仮定して、軌跡を考える。その結果、減速・停止・発進のようすを赤線の通り推定する。

推定した軌跡から交差点上流と下流の旅行時間を計算し、これと自由旅行時間の差を、車両ごとの遅れとする (図 4 の青矢印)。さらに車両ごとの遅れを合計したものを、切り替えの結果として生じる遅れとして、それぞれの組合せで求める。

4. 十字路単独交差点への適用

十字路の単独交差点に提案ロジックに基づく制御を適用させることを考え、制御設計の手順の整理、そして設計した制御をマイクロ交通シミュレータに実装した実験に取り組む。このとき、提案制御の場合と比較することを目的に、既存の定周期制御を適用させる場合についても同様に検討する。

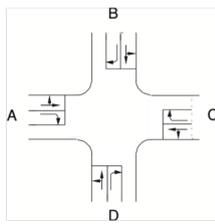
(1) 概要

本章では、図 5(a) で示す幾何構造の交差点を考える。これは、交通工学研究会が編纂した「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-」²⁾ の第 II 編第 3 章「信号交差点」に収録されている制御設計の事例のひとつである。

ここで示されている制御設計の事例のうち、本章では、交差点幾何構造 (車線構成や交差点の大きさ)、および交通需要 (設計時間交通量) を踏襲する。ただし、飽和交通流率に関しては、制御設計の事例として掲載されている値ではなく、本稿で用いるマイクロ交通シミュレータより得られる値を用いる。そして、各方向の設計速度を 45 km/h とし、制御設計の事例とは異なる値とする。

まず、幾何構造について、4 つの流入部それぞれが直

	AB AC	AD	BC BD	BA	CD CA	CB	DA DB	DC
AB & AC	0	1	1	0	1	1	1	1
AD		1	1	1	0	0	1	1
BC & BD			0	1	1	0	1	1
BA				1	1	1	0	0
CD & CA					0	1	1	0
CB						1	1	0
DA & DB							1	1
DC								0



(a) ①の場合

	AB AC	AD	BC BD	BA	CD CA	CB	DA DB	DC
AB & AC	0	1	1	0	0	0	1	1
AD		1	1	0	0	0	1	1
BC & BD			0	1	1	0	0	0
BA				1	1	0	0	0
CD & CA					0	1	1	0
CB						1	1	0
DA & DB							1	1
DC								0

(b) ②の場合

図-6 4 枝 2 車線流入部の交差点での動線交錯の例

進・左折の混用車線と右折専用車線の 2 車線流入路から構成されている。交差点に到着する各流入部の車両は、交差点で直進、あるいは右左折することができるものとし、転回 (U ターン) は想定しないこととする。右折専用車線の長さは交通需要に対して十分に確保されており、右折車が滞留し直左混用車線を通過する車両に影響を与えることはないものとする。また、青矢を用いた直左専用現示・右折専用現示による、流入路別の制御が可能であるものとする。

次に、交通需要条件について、各流入路の交通需要を図 5(b) として与える。このとき、4 方向の各流入部に到着する車両を交通流として想定して、横断歩行者はおらず、横断歩道も設置されていないものとする。

なお、提案制御については、車両感知器による交通流のモニタリングを前提とする。今回は、車両感知器として画像式のセンサを使用し、交通の状況を面的に把握することを想定する。ここで、交差点内および周囲 $D = 60 \text{ m}$ を検知領域と定め、検知の結果、この領域内の対象流入部・車線に存在するすべての車両の軌跡データを欠損なく、かつ瞬時に取得できているものとする。特に右左折や直進といった進行方向について、停止線上流においては、各流入部の第 1 車線 (直左混用車線) に位置することが検出された場合は直進、第 2 車線 (右折混用車線) に位置することが検出された場

合は右折するものとみなし、交差点内においては、進行方向を正確に把握できるものとする。

(2) 提案制御による制御設計

提案ロジックに基づいて信号の切り替えをするために、まずは、動線交錯に関する制約条件の定義および動線同士の関係性の整理を行い、実現可能となる通行権を第 3 章で説明した方法で列挙する。これとともに、信号の切り替わり時に必要となる時間長 δ_1 の根拠となる信号切り替え処理に関する定義、単位判断時間間隔 δ_2 および近未来推定時間長の τ の設定を行う。そして、第 3 章で説明した基本のロジックにこれらを当てはめる。

a) 動線交錯の制約の定義と組合せの列挙

今回の十字路交差点では、流入路が 8 ある。ここで、直進と左折の動線については、混用車線として両者は常に同時に制御されるため、ひとつの動線としてみなすこととする。したがって、動線の数も同様に 8 となる。

動線交錯の制約条件として、今回は次の 2 つを考える。

① すべての動線交錯を許容しない

異なる 2 つの動線のうち、交錯が生じるものに関しては同時に通行権を与えないこととする。

② 右折と対向する直進・左折の交錯のみ許容する

①のうち、右折の動線とそれに対向する直進・左折の動線による交錯に限っては許容するものとする。

このとき、動線の関係性は、それぞれ図 6 のようになる。網掛けで示した部分は、2 つの定義によって要素が異なる場所である。このように、①の場合は交錯が生じる動線に対応するすべての要素に 1 を与えている一方で、②では、交錯を許容する動線同士に対応する要素には 0 を与えている。

そして、第 3 章で説明した方法によって、交錯が認められない部分の数を計算し、実現可能な通行権の組合せを列挙する。このとき、動線同士の交錯関係を定義した図 6 に対応した行列である F は、①と②でそれぞれ、

$$F = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

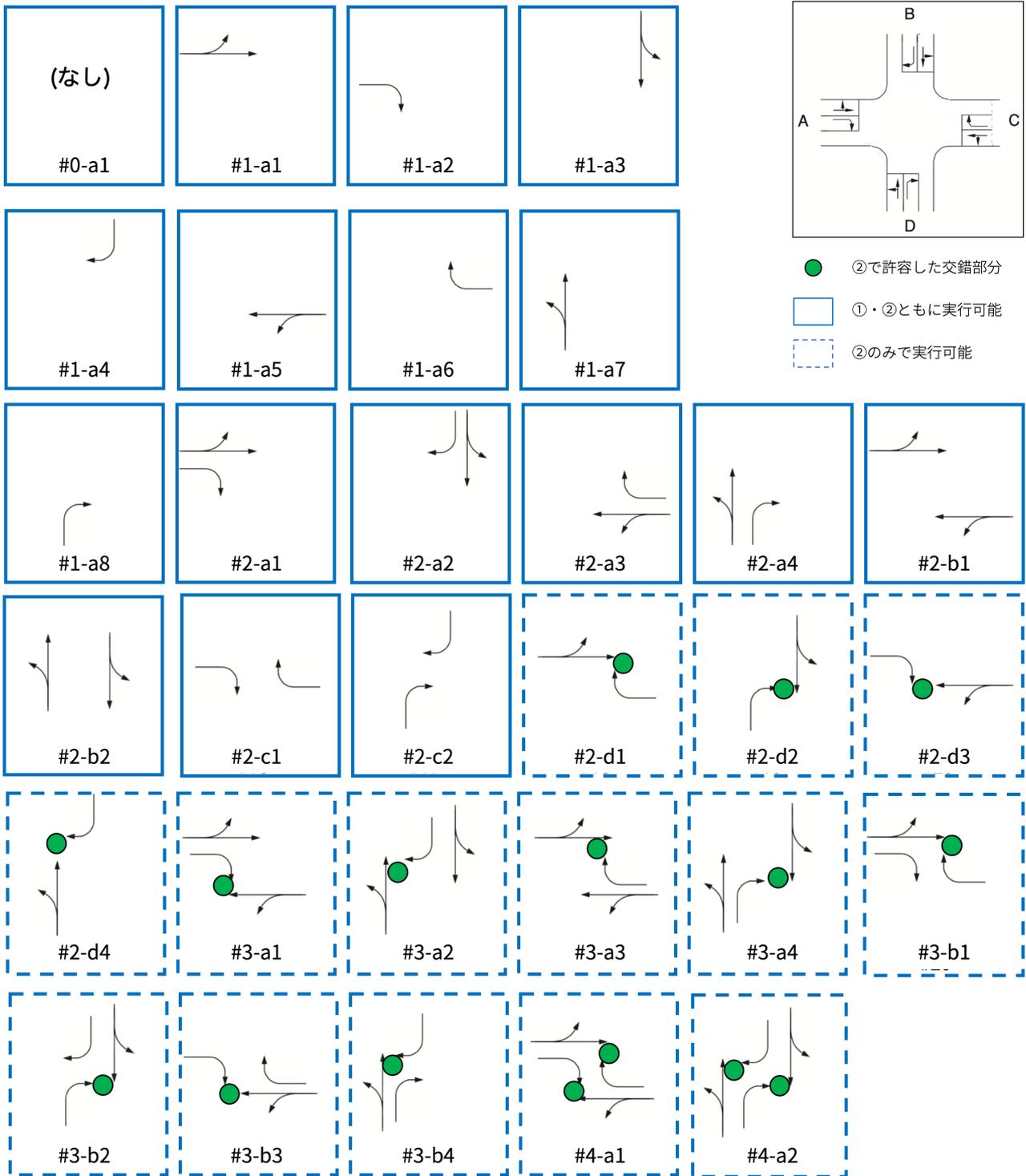


図-7 4 枝 2 車線流入部の交差点で実現可能な組合せの列挙

$$F = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

図 7 は、①あるいは②の制約条件のもとに交錯部分の数 $C = 0$ 、つまり実現可能なものとして列挙された通行権の組合せである。ここで、動線交錯を考慮しない場合の通行権の組合せの総数は、 $256 (= 2^8)$ 通りある。そのうち実現可能なものは、①では、青線枠で示した 17 通り、②では、青線枠の 17 通りと青破線枠の 14 通りを合計した 31 通りとなる。それ以外の 239 通り、あ

流入部	A		B		C		D	
車線	左折・直進	右折	左折・直進・右折	左折・直進	右折	左折・直進	右折	左折・直進・右折
車線数	1	1	1	1	1	1	1	1
飽和交通流率 S	1,790	1,340	1,460	1,810	1,340	1,320		
設計時間交通量 q	555	160	430	510	180	350		
流入部各車線の需要率	0.311	0.120	0.294	0.281	0.135	0.264		
現示の需要率	1φ	0.311		0.281				現示の需要率
	2φ		0.120		0.135			0.311
	3φ			0.294			0.264	0.135
有効青時間[秒]	1φ	27		27				交差点の需要率 0.739
	2φ		11		11			
	3φ			27		27		
交通容量 C_i	660	201	540	670	201	489		サイクル長[秒]
q/C_i	0.840	0.793	0.795	0.761	0.893	0.715		73
交通容量の照査結果	OK	OK	OK	OK	OK	OK		

		1φ	2φ	3φ
現示				
流入部	A	左折・直進 右折	G26 Y3	R Y3AR2
	B	左折・直進・右折	R	R G26 Y3AR2
	C	左折・直進 右折	G26 Y3	R G8 Y3AR2
	D	左折・直進・右折	R	R G26 Y3AR2
時間[秒]	C=69	29	13	31

図-8 定周期制御における交通制御設計の検討案

るいは 225 通りは、許容しない交錯が少なくとも 1 つ以上存在する組合せであり、実現可能ではないものとして分類される。

実現可能な組合せの内訳を見てみると、まず、①と②の場合ともに、いずれの動線にも通行権を与えない組合せが 1 通り (#0-a1) ある。また、1 つの動線にのみ通行権を与える組合せとして、交差点における動線の数と同じだけ、つまり 8 通りある (#1-a1 から #1-a8)。通行権を与えられた動線の数が 2 のものについては、①では 8 通りあり、そのうちの 4 通りが同一の流入路を起点とする直進・左折の動線と右折の動線の組合せ (#2-a1 から #2-a4)、2 通りが互いに対向する関係にある直進・左折同士の動線の組合せ (#2-b1 と #2-b2)、2 通りが互いに対向する関係にある右折同士の動線の組合せである (#2-c1 と #2-c2)。②の場合は、①の 8 通りに加えて、互いに対向する関係にある直進・左折と右折の動線の組合せが 4 通りあって (#2-d1 から #2-d4、許容する交錯部分は 1 つ)、合わせて 12 通りとなる。さらに、3 つの動線に通行権を与えられた組合せは、①では 0 通りであるが、②では、同一の流入路を起点とする直進・左折の動線と右折の動線、それに対向する直進・左折の動線と右折の動線、それに対向する右折の動線の組合せとして 4 通り (#3-a1 から #3-a4、許容する交錯部分は 1 つ)、同一の流入路を起点とする直進・左折の動線と右折の動線、それに対向する右折の動線の組合せとして 4 通り (#3-b1 から #3-b4、許容する交錯部分は 1 つ)、合わせて 8 通りある。そして、通行権を与え

られた動線の数が 4 のものは、①では 0 通り、②では、同一の流入路を起点とする直進・左折の動線と右折の動線、それに対向する流入路を起点とする直進・左折の動線と右折の動線の組合せとして 2 通りある (#4-a1 と #4-a2、許容する交錯部分は 2 つ)。なお、通行権を与えられた動線の数が 5 以上で実行可能なものは、①・②ともに存在しない。

b) 信号切り替え処理に関する定義

信号の切り替え時の処理について、既存の制御と同様に、黄信号表示および全赤信号表示を用いることとして定義する。つまり、判断の結果として通行権の組合せを切り替えるとき、対応する動線の信号灯火のうち、青信号表示から赤信号表示に切り替わるものについては黄信号表示を挿入し、また、切り替え前に通行権を与えられていた動線と切り替え後に通行権を与えられる動線が互いに交錯する関係にある場合については、全赤信号表示を挿入することと定める。これらの表示時間長について、今回は簡単のために所与の一定値とし、制御設計例の手順²⁾に従って、黄信号表示時間を 3 秒、全赤信号表示時間を 2 秒と設定する。ただし、特に全赤信号表示については、通行権の組合せがどのように切り替わるのかによって必要となる表示時間長は変化するものであり、本来は想定される切り替えごとに設定することが求められる。提案制御において、これらの表示時間長を適切に設定するための考え方を今後検討する必要がある。

表-1 実験 Case の概要

実験 Case	定周期・交錯許容	提案・交錯許容	提案・交錯なし
制御方式	定周期	提案	提案
動線交錯制約	右折と対向左直のみ許容	右折と対向左直のみ許容	すべて許容しない

c) 単位判断時間間隔と近未来推定時間長の設定

まず、停止線上流の 60 m の検知領域を設計速度の 45 km/h (= 12.5 m/s) で通過するのに要する時間は、4.8 s である。そこで今回は、単位判断時間間隔をこれよりも小さな値として、 $\delta_2 = 4$ 秒に定める。このとき、切り替え処理が生じない場合には ($\delta_1 = 0$ のとき)、交差点に到着する車両は、少なくとも 1 回、判断において考慮されることになる。ただし、切り替え処理が生じる場合には (δ_1 が正のとき)、切り替え判断の間隔が δ_2 よりも長くなるため、車両によっては一度も判断において考慮されることなく交差点を通過することもあり得る。この点を含め、単位判断時間間隔を適切に定めるための考え方を、今後十分に検討する必要がある。

近未来推定時間長について、どのような信号切り替えが生じた場合においても、切り替えの処理が終了するに至るまでの範囲内は推定を行う必要がある。これは、切り替え処理が終了するよりも前に推定を打ち切ると、判断において切り替え処理による影響を適切に考慮できないためである。そこで今回は、切り替え判断の時間間隔 δ の最大値にあたる、黄信号表示時間長 (3 秒)・全赤信号表示時間長 (2 秒)・単位判断時間間隔 δ_2 (4 秒) の和である 9 秒を、近未来推定時間長 τ として定める。これにより、任意の切り替えにおいて、切り替え終了後から少なくとも δ_2 秒経過するまでの間の未来にわたって推定が行われることになる。

(3) 既存の定周期制御による制御設計

既存の定周期制御における制御設計の流れは、「平面交差の計画と設計」²⁾ において示されている。ここでは、まず、現示として用いる通行権の組合せおよびその順序を「信号現示方式」として明示的に定める。そして、設計した信号現示方式および、黄信号表示時間や全赤信号表示時間の設定のもとに、交通需要の大小や方向別の偏りの影響を期待値によって評価して、サイクル長やスプリットを求めるという手順となる。

これに従って設計した検討案を図 8 として示す。このうち、設計時間交通量、および現示として用いる通行権の組合せと順番 (3 現示制御) は制御設計例²⁾ を踏襲する。一方で、飽和交通流率は、本稿で用いるマイクロ交通シミュレータより得られる値を、黄信号表示時間と全赤信号表示時間については、前節の提案制御の設定値と同様に、それぞれ 3 秒、2 秒を必要に応じて

挿入する。そのため、図 8 では、赤字や赤枠で示した部分のみが制御設計例²⁾ と同一となり、それ以外の黒字部分は、本稿で独自に与えた値となる。

信号現示方式について、第 1 現示と第 3 現示では、右折の動線と対向する直進・左折の動線の交錯を許容して、対向する流入部の直進・左折と右折の動線すべてに対して同時に通行権を与えている。したがって、今回の信号現示方式における動線交錯の制約条件は、前節で示した 2 つの制約条件のうち②に相当する。また、左右方向の交通には第 2 現示として右折専用現示を設けている。

サイクル長やスプリットの計算で用いる車線ごとの飽和交通流率に関しては、今回は「平面交差の計画と設計」の附録 4 で紹介されているモデルに基づいて求めている。この計算では、車線別飽和交通流率の基本値が必要であるが、本稿の実験で用いるマイクロ交通シミュレータの性能検証により得た、2160 [台/有効青 1 時間] (直進車線)・1340 [台/有効青 1 時間] (右折車線と左折車線) を与えている。

(4) ミクロ交通シミュレータによる評価実験

a) 実験の概要と設定

本章で対象とする幾何構造と交通需要条件を有する十字路単独交差点に、それぞれの信号制御の制御設計で定めた内容を当てはめて、マイクロ交通シミュレータ上で実験を行う。具体的には、既存の定周期制御の 1 種類、提案制御における交錯の制約条件の異なる 2 種類の計 3 種類を「実験 Case」として定め、それぞれマイクロ交通シミュレータに実装する。そして、それぞれの実験 Case でシミュレーションを実行し、各車両が被った遅れや信号の切り替わりのようすなどを比較する。

これら 3 種類の実験 Case のそれぞれは、制御の方式と動線交錯の制約条件の 2 点において相違点がある。これについてまとめたものを表 1 として示す。前章で述べた通り、「定周期」と「交錯許容」のふたつでは、ともに右折の動線と対向左直の動線の交錯のみを許容しており、動線交錯の制約条件は両者で同じである。一方で、「提案・交錯許容」と「提案・交錯なし」では、制御方式は両者ともに提案ロジックに基づいているが、動線交錯の制約条件について、前者は右折の動線と対向左直の動線の交錯のみを許容、後者はすべての動線交錯を許容しない。これらの実験結果を比較すること

で、制御方式と動線交錯の制約条件の 2 つの観点から、提案制御に関する検討が行えるものと考えている。

ここで、実験に用いるマイクロ交通シミュレータは、SUMO 1.9.2 (Simulation of Urban MObility)¹⁷⁾ とする。SUMO について、交通シミュレータの性能検証マニュアル¹⁸⁾ に従った性能の検証を行っている¹⁹⁾。

車両到着パターンはポアソン到着を仮定し、車両として乗用車 (希望速度 45 km/h) のみを、1 回あたり 960 秒間発生させる。そのうち時刻 $t = 301$ 秒から 900 秒までの 600 秒間を評価の対象とし、ひとつの実験 Case につき 30 回繰り返す。30 回のそれぞれにおいて、車両到着パターンを生成する際の乱数を変化させ、同じ実験 Case の範囲内で複数回の実験を行うことで、すべての流入路で 500 程度のサンプルを確保する。

■ 提案制御の設定

今回は、単位判断時間間隔ごとに、前節で求めた実行可能な組合せである 17 通り、または 31 通りのなかのいずれかに切り替えが行われる (連続で同じ組み合わせが選ばれて、見かけ上切り替えが行われない場合もある)。

なお、提案ロジックで計算する遅れの定義について、今回は交差点上流 60 m から交差点下流 20 m の旅行時間に着目する。交差点を減速や停止をせずに青信号で通過できた場合の旅行時間を自由旅行時間とし、実際に各車両が経験した旅行時間と自由旅行時間との差を 1 秒単位で求め、各車両が被った遅れとする。

■ 定周期制御の設定

前節で定めた制御設計に従って、信号を切り替える。なお、本稿で行う実験では、提案ロジックでの単位判断時間間隔 δ_2 を 4 秒と定めており、結果として実現する各灯火の表示時間長はこれの影響を受ける。そこで図 8 として設計した定周期制御においても、各現示が開始する直前に表示される全赤信号表示時間長と、各現示の青信号表示時間長の和が 4 秒単位になるように信号切り替えタイミングを設定し、両制御で実験条件を揃えている。

b) 実験の結果

実験結果のひとつとして、各流入路を通過した車両がそれぞれの実験 Case で被った平均遅れを、A, B, C, D の流入部ごとに、図 9 として示す。「提案・交錯許容」の実験 Case がすべての場合で平均遅れが最も小さくなり、その次に小さいものが、ほとんどの場合で「定周期・交錯許容」、次いで「提案・交錯なし」となった。また、流入部別には、従道路に相当する流入部 B と D の方向のほうが、主道路に相当する流入部 A と C の方向よりもより遅れが大きくなる傾向にあり、定周期制御よりも提案制御でその傾向が強いことがわかる。車

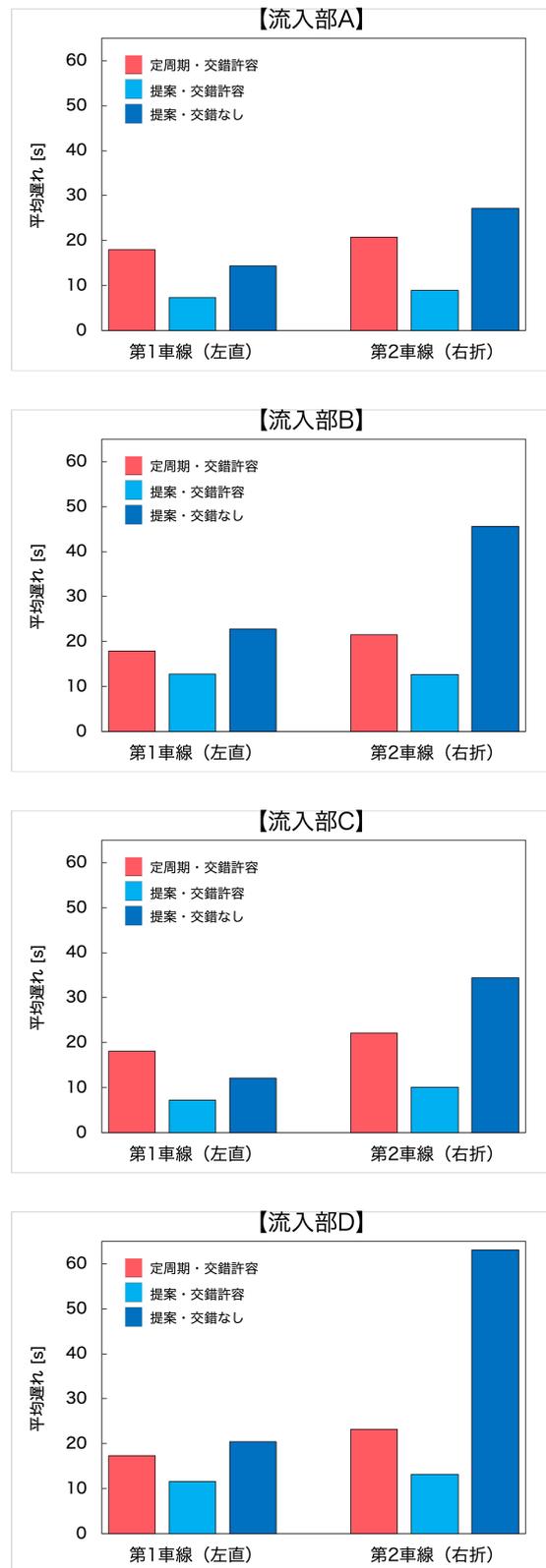


図-9 流入路ごと車線別の平均遅れ

線別では、右折専用車線のほうが左直車線よりも遅れが大きくなる傾向にあり、こちらも定周期制御よりも提案制御でその傾向が強いことがわかる。

当日の発表に向けて、結果の取りまとめと分析を進めていき、例えば各実験 Case における遅れの分布などを

示していく予定である。また、現在、マイクロ交通シミュレータに内蔵された車両挙動モデルに起因して、実験結果の一部に誤りが生じる可能性があることがわかっている状況である。今後、信頼度が十分に担保されている実験結果を発表できるように実験環境の精査と調整を進めていくつもりである。

5. 特性評価

前章で扱った制御設計手順の整理やマイクロ交通シミュレータによる実験といった、提案制御の適用に関する検討を通して得られた内容をまとめ、提案制御のもつ特性を評価する。本稿では、特に前章の前半部分で扱った制御設計に関する内容について言及する。

(1) 制御設計に関する特性評価

提案制御による制御設計では、「実現可能な通行権の組合せを列挙するための動線交錯の制約条件の定義と関係性整理」「信号切り替え処理の定義」「単位判断時間間隔および近未来推定時間長の設定」を行う。

ここで、提案制御では、現示として用いる組合せやその順番を前提としないため、制御設計においてこれらを設定する必要がないといえる。このとき、サイクル長やスプリットといった概念、また、その計算で用いる設計時間交通量や飽和交通流率などといった、交通状況を期待値的に評価した指標も不要になる。特に、制御設計において期待値に基づく評価指標を用いない、つまり交通状況の期待値的な評価を行わないことについては、本来は期待値のまわりでばらつきをもって変化する交通現象を適切に考慮するうえで有効になる可能性がある。

また今回は、動線交錯の制約条件として2通りの場合を考えたが、提案制御では、両者はあくまでも実現可能な通行権の組合せが異なるだけであり、基本のロジックそのものは共通のものとして扱うことができる。一方で、前章で示したような現示とその順番を明示的に設定する既存の制御では、制約条件によって「現示」として用いる通行権の組合せや順番そのものの設計が異なり、それに応じてサイクル長やスプリットもすべて異なることになる。このように、既存の制御では、制約条件といった制御の要件によって制御設計のすべてが作り分けられるのに対して、提案制御では、制御の要件に関わらず共通のロジックをあてはめることができるという違いがあり、この点も提案制御の特性になり得るだろう。

6. おわりに

今回は、車両感知器を活用した信号制御として筆者らが提案する新たな方法について、これを適用させるうえで必要な考え方を整理し体系づけるための検討を進めた。特に本稿では、十字路の単独交差点に提案制御を適用させることを想定して、制御設計の手順の整理を行うとともに、マイクロ交通シミュレータを活用した実験に取り組んだ。また、これらの検討に基づき、提案制御の特性を評価した。

その結果、通行権の組合せやその順序を前提としない提案制御では、交通状況の期待値的な評価が不要になることや、制御要件に関わらず同じロジックを当てはめられることといった、制御設計上の特性を有することがわかった。また、マイクロ交通シミュレータの実験結果からは提案制御が一定の性能を有することを示したものの、これに基づいて特性の評価を行うためにはさらなる分析が必要である。

そこで、研究発表会当日に向けて実験結果の分析をさらに進めていき、実験結果が得られたメカニズムの検証を通じた特性評価、提案制御が有利・不利となる条件や制御として求められる考え方の考察に取り組み、提案制御の妥当性について議論を深められればと考えている。なお、本稿で示した交通需要条件とは別の条件を適用させた場合の検証や、異なる現示設計に基づく定周期制御との比較なども予定しており、適切な成果が出た際には併せて報告したい。

今後の展望として、まずは、本稿で扱ったような提案制御の適用に関する検討について、さまざまな場面を想定しながら引き続き取り組んで制御に求められる考え方を体系化していきたいと考えている。なお、提案制御をネットワーク交通流制御に適用させるための考え方の整理などにも、この検討の一部として取り組んでいくつもりである。そして、パラメータとして与えている単位判断時間間隔 δ_2 や検知領域 D の影響の検証や、取得した検知のデータに誤りや欠損がある場合の考慮といった、提案ロジックや交通流モニタリングをより適切なものに改良するための技術的な検討も計画していければと考えている。

車両感知器を活用した信号制御について、これからさまざまな観点から検討を進めていき、交通流モニタリングのさらなる活用のもとにより適切な信号制御・交通管制を実現するためのあり方を検討していくつもりである。

謝辞: 本研究は、一般財団法人トヨタ・モビリティ基金の支援による「自律分散型信号システム研究開発」の

一部として実施した。

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) 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, 2018.
- 3) Lin F.B., V. S.: Adaptive signal control at isolated intersections, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.114, No.5, pp.555–573, 1988.
- 4) Miller, A. J.: A computer control system for traffic network, *Proc. 2nd Int. Symp. on Theory of Road Traffic Flow*, pp. 201–220, 1963.
- 5) Bang, K.-L.: Optimal control of isolated traffic signals, *Traffic Eng. Control*, Vol.17, No.7, pp.288–292, 1976.
- 6) Gartner, N. H.: Opac: a demand-responsive strategy for traffic signal control, *Transportation Research Record 906*, pp. 75–81, 1983.
- 7) 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, No.2, 2002.
- 8) 久井守・金子数馬: 系統交通信号の制御パラメータ連続自動調整によるリアルタイム制御の一方式, *土木計画学研究・論文集*, Vol.24, No.4, pp.877–885, 2007.
- 9) 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.
- 10) Zheng, X. and Recker, W.: An adaptive control algorithm for traffic-actuated signals, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.30, pp.93–115, 2013.
- 11) 岩岡浩一郎・新倉聡: 流入路別現示の適用とその考察, *交通工学論文*, Vol.1, No.2, pp.B53–B59, 2015.
- 12) Road, G. and Association, T. R.: *RiLSA (Guidelines for Traffic Signals)*, 2015.
- 13) 交通工学研究会: *交通信号の手引*, 丸善出版, 2006.
- 14) 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, *生産研究*, Vol.72, No.2, pp.147–152, 2020.
- 15) 白畑健・伊藤昌毅・鳥海梓・新倉聡・大口敬: 交差点におけるセンサを活用した自律型交通信号制御手法の評価, *第 62 回土木計画学研究発表会・講演集*, 2020.
- 16) 白畑健・伊藤昌毅・鳥海梓・新倉聡・大口敬: 交通現象の検知と評価に基づく逐次的な交差点信号制御の開発, *第 63 回土木計画学研究発表会・講演集*, 2021.
- 17) M. Behrisch, L. Bieker, J. E. and Krajzewicz, D.: Sumo – simulation of urban mobility: An overview, *Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*, pp. 63–68, 2011.
- 18) 交通工学研究会交通シミュレーション自主研究委員会: *交通流シミュレーションの標準検証プロセス Verification マニュアル*, 交通工学研究会, 2002.
- 19) K. Shirahata, M. Ito, A. T. and Oguchi, T.: Verification of right-turn behavior in sumo at a signalized intersection, *SUMO user conference 2020*, 2020.

(Received October 1, 2021)

Characterization of Autonomous Traffic Signal Control at an Isolated Four-leg Intersection

Ken SHIRAHATA, Masaki ITO, Azusa TORIUMI,
Satoshi NIIKURA and Takashi OGUCHI

Most of the traffic signal control method based on detection of traffic phenomena treats phases as fixed and involves the prediction of traffic demand which will arrive in the future. We proposed a method that sequentially decides near-future control strategy at short time intervals by treating all permitted combinations of right-of-way without specifying the order. Our proposed method is called "the autonomous decentralized signal control," and have shown that it has a certain performance. In this paper, as a study of an application of our proposed method to an isolated intersection with four arms, the control design procedure of the method is organized, and several experiments are conducted by using a micro traffic simulator. As a result, it was found that evaluation of traffic situation by using expectation is not necessary in the control design, and that our proposed method can be commonly applied regardless of constraints of control.