

交差点での歩行者通行量に応じた信号制御

馬越¹ 柴田直樹¹

概要：高度に発達した現在の交通システムにおいて、車両を目的地まで早く運ぶために最も重要なのは、交差点での車の待ち時間をいかに短縮するかということである。交差点における車両の待ち行列を制御し、車両の平均待ち時間を短縮するために、ニューラルネットワークや遺伝アルゴリズムなどを用いる手法ことが提案されているが、既存の手法のほとんどは車両のみに注目している。しかし、車両だけではなく歩行者の行動も車両の動きに影響を与える。本稿では歩行者が車両に与える影響について簡単に説明し、車両の動きを最適化するために、交差点における歩行者の数に基づいた新しい制御方法を提案する。

キーワード：交通信号制御，歩行者，高度道路交通システム，交差点

1. はじめに

現代社会においては人々が移動するための交通手段として自動車が大きな位置を占める。交通渋滞は人々が自動車移動の際に直面する大きな問題の一つである。自動車をいかに早く目的地まで到達させるかは、交通を研究するすべての研究者に共通するテーマである。地下鉄や路面電車の運行とは異なり、道路上では車両の到着時刻に影響を与える不確定要素が多く、交差点での車両の性能もこれに含まれる。

本研究では、歩行者の数に応じた交差点での信号制御について検討する。交差点において車両が左折や右折をする際にかかる時間に対して、道路を横断する歩行者の有無が大きな影響を与える。交差点においては歩行者が優先であるので、歩行者がいれば待ち時間が発生する。従って、交差点にいる歩行者の数が、車両が交差点を通過する時間に影響する。歩行者の数に応じて適切な信号システムのパターンを適切な環境で使用することで、車両の待ち時間を効果的に短縮することができる。歩行者の数が車両の交差点通過時間に影響するとすれば、交差点で従来の信号を歩行者数に応じた歩車分離信号に変更することで、車両の通過時間が短縮されるかどうかについて検討することが本稿の主な貢献であり、このために信号制御システムのための車両の交差点通過時間モデルを提案する。本稿で提案する方式を用いると、様々な交通状況において対応する最適な信号制御モードに変更することが可能となり、全ての車両が最短時間で交差点を横断し、より早く目的地に到達することができる。本研究では交通シミュレーションツール SUMO を用いて提案手法の有効性を評価する。

2. 関連研究

2.1 自律走行車と歩行者の対話

自律走行車の実現には、他の道路利用者と対話し、歩行

者などの意図を理解する能力が必要とされる[1]。つまり、車両は多くの要因に依存する歩行者の行動を理解する必要がある。これらの要因は、歩行者とドライバーの相互作用に関する古典的な研究と、自律走行車に関する研究の2つのセクションで調査することによって特定される。

歩行者行動に影響を与える要因は、古典的な研究と自律走行車に関する研究の2つに分類される。その結果、集団の大きさは社会的要因の中で最も影響力のあるものの1つであることがわかった[1]。ドライバーは歩行者の集団を待つ傾向が強い。また、歩行者流動と歩行者の間には直線的な関係がある。一般に、歩行者は集団が密集しているほど遅く歩く。社会規範や模倣などの他の要因も、歩行者の行動に影響を与える。人口統計学では、歩行者の行動は性別に最も影響される。一般的に女性は男性よりも用心深いという研究結果もある[2]。また、年齢も重要な要素である。一般に、高齢の歩行者は成人と比べて身体能力が低く、その結果、歩く速度も遅くなる[3]。状態、特性、能力といった他の主な要因も、歩行者の通行パターンに影響を与える。信号機や横断歩道などの道路境界線は、交通参加者の行動に大きな影響を与える[4]。道路構造や道幅が横断の危険度に影響する。天候や照明の状態は、様々な形で歩行者の行動に影響を与える[5]。悪天候は歩行者の速度を低下させ、道路状況に影響を与える。

動的要因では、重要な動的要因の1つはギャップアクセプタンス、つまり歩行者が横断するのに安全だと考える交通のギャップの大きさである。車速と車間距離の効果も単独で研究されている。コミュニケーションは交通の曖昧さを解決する主要因の1つと考えられている。コミュニケーションの欠如やミスコミュニケーションは交通紛争の大きな要因となる。

歩行者は、車両の加速度、減速度、交差点までの距離など、車両の状態を観察することで、車両の意図を知ることができる。また、車両はこの方法で歩行者とコミュニケー

¹ 奈良先端大学院大学
Nara Institute of Science and Technology

ションをとっている。また、車両はLEDフィールドを使用し、自律走行時には別の色に変化することで、運転モードを表示する。一方、人間の行動は、過去と現在の行動を観察することで、そのダイナミクス、現在の活動、文脈から意図を予測することができる。人間の意図を理解することは、常に多くの研究者を惹きつけてやまない研究テーマである。

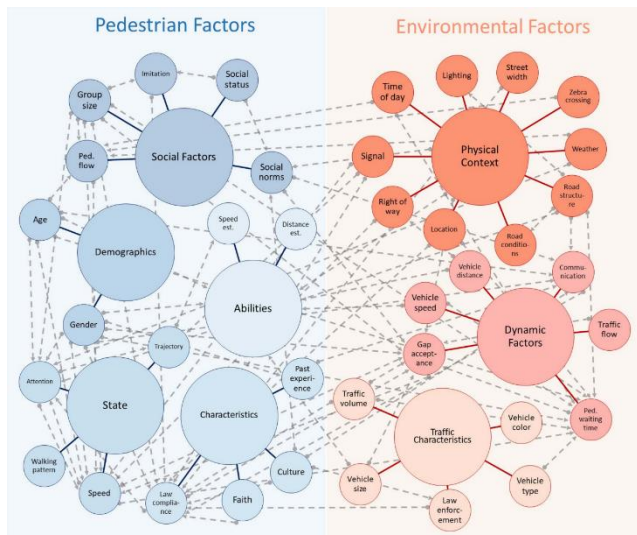


図 1 横断時の歩行者の意思決定に影響を与える要因。大きな円は主要因、小さな円は副次的要因である。[1]

2.2 交通信号制御における計算知能

一般的に使用されている計算知能のパラダイムをいくつか紹介し、都市部の一般道や高速道路網の交通信号制御システムへの応用を分析する。既存の都市交通信号制御は、最適な交通制御・管理の役割を十分に果たしているとは言えない。調査によると、高度な交通信号制御システムは、交通事故や車両移動時間を減少させる。交通信号制御の方法は、事前時刻制御、交通応答制御、インテリジェント制御の3つの段階を経てきた。定時制御方式は、比較的安定した一定の交通流に適している。センシング技術の発展に伴い、リアルタイム交通応答制御が実用化された。リアルタイムの交通データに基づいて、あらゆる交通信号の動作を変化させる。この方法は、交通飽和度が80%未満で、交通のランダム性が比較的高い場合に適する。この方法は、現在の位相しか考慮しない。そのため、最適な資源利用を実現することができない。

交通信号制御において計算知能を利用する理由はいくつかある。まず、交通信号システムは大規模で複雑な非線形確率システムである。そのため、最適な交通信号の設定を見つけることは困難である。第二に、数学的な交通モデルを用いて交通信号の最適解を求めることは困難であり、動的な交通を正確にモデル化することは容易でない。また、動的な交通を正確にモデル化することは容易ではない。第

三に、CIは複雑で不確実、かつ変化する環境において、より良いパフォーマンスを発揮することができる。

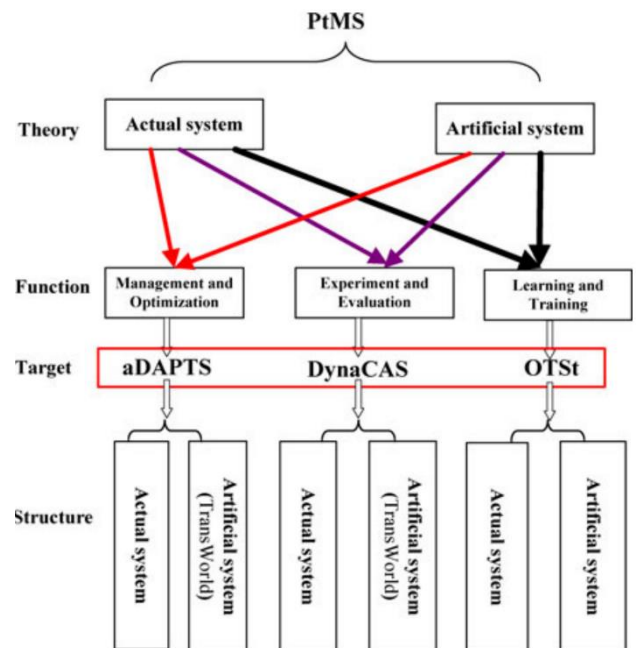


図 2 PtMS の階層的なシステム構造[6]

2.3 交通信号制御によるエネルギーと排出への影響

このエネルギー・排出量モデルは、INTEGRATION モデルと組み合わせることで、ITS と非 ITS の導入による環境影響を定量的に評価することができる[7]。INTEGRATION モデルは、車両の走行開始、速度選択、車線変更、リンク間遷移、経路選択などを議論することで、交通の流れを表現することができる。

2.3.1 車両トリップの開始

ネットワークで使用される車両は、最初に生成される必要がある。すべての車両には、出発希望時刻、出発地と目的地、および固有の車両番号のタグが付けられる。

2.3.2 車速の判定

シミュレーションの時計が特定の車両の出発時刻になると、この車両は出発地点のゾーンから目的地に向かってネットワークに入ろうとする。車両はどのレーンに入るかを選択すると、希望する速度を計算する。この速度は、同じ車線内ですぐ下流にいる車両との車間距離の差に基づいている。

2.3.3 車線変更ロジック

自動車は任意に、あるいは強制的に車線を変更することがある。車線変更するかどうかは、現在の車線を走行する場合と、現在の車線の左側と右側を走行する場合の3つの潜在的な速度に基づいて決定される。任意車線変更では、車速を最大化することを目的としているが、強制車線変更は、主に各リンクの終点で車線の接続性を維持する必要性

から発生する。一度車線変更が完了すると、一定時間まで次の車線変更ができなくなる。

2.3.4 加速度制約

車追従型モデルでは、非現実的な高い車両加速度になる可能性がある。INTEGRATION モデルは、車両のパワー、重量、総重量のうち牽引軸にかかる割合、正面面積、およびさまざまな転がり係数に基づいて、最大車両加速度を計算する。

全体として、この研究は、ツールが ORNL から得られたフィールドデータと同じ燃料消費量と排出量を予測することを実証している。また、車両の燃料消費量と排出量は、車両の加速度や速度に影響されることがわかった。

2.4 容量考慮型背圧式交通信号制御法

先行研究では、待ち行列の容量が無限であると仮定して、いわゆる背圧制御を用いると、信号交差点における安定性が保証されることが語られている。本課題では、待ち行列容量が有限の状況下で、非作業保存と輻輳伝播の原因を特定し、背圧制御について議論した[8]。正規化された圧力は、仕事の保存を保証し、輻輳の伝播を緩和し、低トラフィック密度領域での公平性を同時に引き受け、容量が無限大に成長するにつれて、最初に背圧を回収することができる。渋滞が激しくなると、容量考慮型バックプレッシャー制御の性能は向上する。しかし、現状では、自律走行車は実用化されておらず、人間が運転する車が信号機によって調整されている[9]。しかし、現状では自律走行車が実用化されておらず、人間が運転する車は信号機で調整されている。

いわゆる背圧は、待ち行列の長さに依存する制御を適用するために計算され、おそらく最大の安定性に達することができます[10]。このアルゴリズムの大きな特徴は、交差点ごとに発行できることであり、交差点に関する局所的な情報のみを必要とする $O(1)$ アルゴリズムの実行によって実現されることである。

しかし、現在のバックプレッシャートラフィックの要件の一つは、無限のキュー容量である。交差点入口の待ち行列が増加し、上流の交差点に到達すると、混雑が伝播する。この現象は容易に観察することができる。待ち行列理論では、これを一般にブロッキングと呼び、多くのブロッキングの種類を議論することができる。ブロッキングは、最悪の場合、デッドロックにつながる。

その結果、交差点ごとに分散できる、複雑度が $O(1)$ であるという重要な利点を維持するために、ネットワーク内のすべてのノードで圧力を計算する必要がある。本研究では、圧力計算のために待ち行列の容量を考慮した。その主な考え方は、満杯の待ち行列がその容量とは無関係に、すべて同じ正規化された最大圧力を発揮するように圧力を正規化することである。

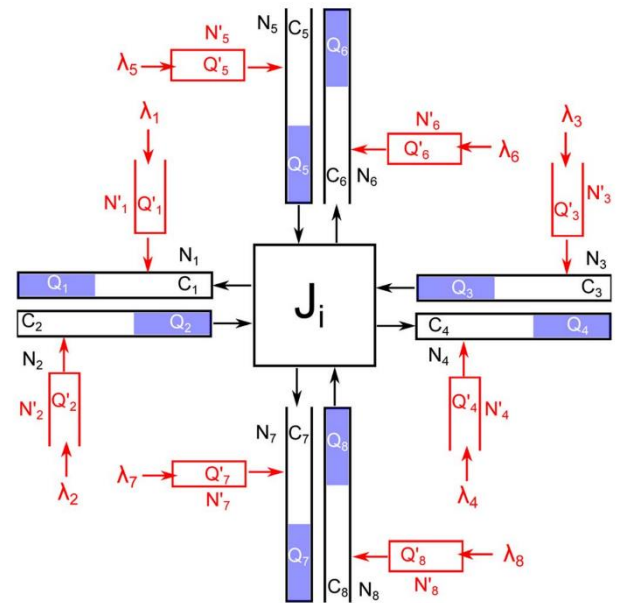


図 3 4つの受信ノードと4つの送信ノードを持つ接合部。

2.5 本研究の新規性

著者ら調査した限りにおいて、歩行者が車両通行に与える影響に関して調査を行った研究は存在しなかった。本研究においては、先行研究と異なり、交差点における歩行者数に応じた信号制御方式を提案する。

3. 歩行者が車両交通に与える影響

3.1 歩行者が車両通行に与える影響

交差点で車両が左折または右折する場合、同じ方向に歩行者が通行しているかどうかを考慮する必要がある。歩行者が通行する場合は、一定時間待たなければならない。歩行者の数が変われば、車が通過する時間も変わる。歩行者が多いと、交差点において自動車が詰まってしまう、通過することができない。これはスクランブル交差点でも発生する。一般的に、歩行者が多ければクルマの待ち時間が長くなり、少なければクルマが待たなくて済む。

この推測の正しさを確認するために、実際の道路を使ったシミュレーションを実施した。シミュレーションの結果、歩行者が多い場合、車両の待ち時間が長くなり、交差点を通過する車両が少なくなることが結論付けられた。歩行者の数が減ると、車両の待ち時間が短くなり、通過する車両の数が増える。歩行者の数がある程度まで減ると、車両の待ち時間と通過台数が滑らかになる傾向がある。

3.2 異なる信号制御方式における歩行者が車両への影響

交差点で異なる信号制御方式を用いた場合に、歩行者数が車両移動に与える影響が変化するかどうかを検証した。日本では、信号制御方式は従来型とスクランブル型の歩車

分離信号が大半を占めている。歩車分離信号の歩行者要素は、従来の信号よりも車両への影響が少ないという仮説を立てている。

3.1と同じモデルでシミュレーションを行った結果、同じ車両数であれば、従来信号の歩行者数は車両移動に大きな影響を与え、歩車分離信号の歩行者数は車両移動にほとんど影響を与えないことがわかった。

これに加えて、より多くの交通シナリオに対応するための新しい信号制御方式を提案した。

4. 評価結果と考察

本研究では、歩行者の数が交差点における車両の通行に影響を及ぼすと結論付けている。歩行者の数は、信号システムの違いによって車両移動に与える影響が異なる。従来の信号では歩行者の数が車両の通行に大きな影響を与えることがあります。歩行者分離信号では歩行者が車両に与える影響はほとんどない。この場合、車両の左折と右折は歩行者の影響を受けない。歩行者数が非常に多い場合、分離型歩行者用信号は従来の信号よりも優れた性能を発揮する。歩行者が非常に少ない場合、従来の信号の方が分離信号より性能が良い。

歩行者の数に応じて最適な性能の信号システムを選択することで、車両移動の効率に大きな改善をもたらすことができる。

5. おわりに

本稿では、交差点における車両移動の効率化に関する研究の概要を紹介した。また、歩行者の数が通過する車の数に与える影響のモデル化を行った。今後は、信号制御システムの変換が最も車両効率の向上につながる条件を明らかにするための研究を進める予定である。

参考文献

- [1] Amir Rasouli and John K Tsotsos. Autonomous vehicles that interact with pedestrians: A survey of theory and practice. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(3):900–918, 2019.
- [2] Norman W Heimstra, James Nichols, and Gary Martin. An experimental methodology for analysis of child pedestrian behavior. *Pediatrics*, 44(5):832–838, 1969.
- [3] Muhammad Moazzam Ishaque and Robert B Noland. Behavioral issues in pedestrian speed choice and street crossing behavior: a review. *Transport Reviews*, 28(1):61–85, 2008.
- [4] Richard Lewis Moore. Pedestrian choice and judgment. *Journal of the Operational Research Society*, 4(1):3–10, 1953.
- [5] Amir Rasouli, Iuliia Kotseruba, and John K Tsotsos. Agreeing to cross: How drivers and pedestrians communicate. In *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pages 264–269. IEEE, 2017.
- [6] Dongbin Zhao, Yujie Dai, and Zhen Zhang. Computational intelligence in urban traffic signal control: A survey. *IEEE*

- Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 42(4):485–494, 2011.
- [7] Hesham Rakha, Michel Van Aerde, Kyoungso Ahn, and Antonio Trani. Requirements for evaluating traffic signal control impacts on energy and emissions based on instantaneous speed and acceleration measurements. *Transportation Research Record*, 1738(1):56–67, 2000.
 - [8] Jean Gregoire, Xiangjun Qian, Emilio Frazzoli, Arnaud De La Fortelle, and Tichakorn Wongpiromsarn. Capacity-aware backpressure traffic signal control. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2(2):164–173, 2014.
 - [9] Kurt Dresner and Peter Stone. A multiagent approach to autonomous intersection management. *Journal of artificial intelligence research*, 31:591–656, 2008.
 - [10] Leandros Tassioulas and Anthony Ephremides. Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum through-put in multihop radio networks. In *29th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 2130–2132. IEEE, 1990.