

IoT を活用した新しい交通信号システム

佐藤 紘, イヴァン タネヴ, 下原 勝憲 (同志社大学)

A new transportation system which utilizes IoT

1 はじめに

1.1 研究の背景

平日朝の通勤時間や、長期休暇の帰省ラッシュではいつも同じ道で渋滞が発生していると感じる。実際に渋滞によって国民1人当たり年間40時間を損失していると言われている¹⁾。この40時間という時間は年間乗車時間の40%に当たるものである。人々が渋滞で損失する時間が大きいことがわかる。国にとっても交通渋滞が大きな問題となっており、渋滞による経済損失は年間12兆円に上ると言われている²⁾。12兆円は日本の年間自動車総輸出額とほぼ同額であり³⁾、国単位で見ても12兆円が無視できない金額であることがうかがえる。環境面に関しても、日本のCO₂排出量の内15.4%が自動車から排出されている。自動車のCO₂排出量削減のための対策として、スムーズな交通流の実現が挙げられる。走行速度を15km/hから30km/hに向上させるとCO₂排出量を30%抑えられる⁴⁾。これらのことから経済面、環境面においても渋滞が日本の大きな課題であることがわかる。

1.2 研究の目的

既に存在する渋滞解消に有効な手段としては、「道路工事による車線数増加」⁵⁾、「クルーズコントロールシステム⁶⁾」等が挙げられる。また、今後標準化されると見込まれる技術として、「AIを活用した信号制御システム⁷⁾」、「半自動運転トラックの隊列走行⁷⁾」等がある。

このような渋滞対策は基本的に「交通インフラ側の対策」と「車側の対策」として個々に発展しているのが現状である。そこで、昨今の自動運転車普及に伴い車のIT化が進んでいる現状を受け、車と交通インフラが通信し連携することで「新しい渋滞対策」が生まれると考えた。本研究では、その新しい渋滞対策として「優先権制御」の提案及び有効性の検証を行うことを目的とする。

2 優先権制御について

優先権制御のコンセプトは「優先権を持った車が信号に近づくと青になる」というシンプルなものである。類似した信号システムとしては「Green Wave⁸⁾」が挙げられる。Green Waveとは、幹線道路に並んでいる信号機の青になるタイミングを車の速度走行を考慮しずらすことで、車が信号機を連続して通過できるシステムである。一部の国で導入されたが、Green Waveの出口付近や対向車線で渋滞が発生しやすいという問題点があり、世界的な普及に至っていない。そこで動的にGreen Waveを発生させて、必要な場所に必要の時だけGreen Waveを発生させることはできないかと思案し「優先権制御」を考案した。

2.1 優先権の獲得条件

先ほど、「優先権を持った車が信号に近づくと青になる」と説明したが、ここでは優先権の獲得方法について説明する。

深夜など交通量が少ない時は感应式信号機で車を検知して信号機の点灯パターンに影響を与えている。このように、既に車の台数を測る機能は信号機に備わっていることが多い。そこで、優先権制御では、各信号機に並んでいる車の台数を基に、最も並んでいる車列に優先権を与える(図1を参照)。



図1: 優先権付与時のイメージ

また優先権制御では、車と信号機が通信を行うことで成立するものであるため、本研究では自動運転車のみが優先権を扱うことができるとする。なお、優先権は、範囲内を超えた時または駐車した時に失効する。

2.2 優先権制御のメリット

優先権制御はその名前から、優先権を持った車だけ極端に優先されるシステムのように思われる。しかし、優先権を持った車と同じ車列に存在する優先権を持たない車も利得がある。優先権を持たない車は優先権を持った車と一緒に走行することで、目的地までの間の赤信号で停車する回数を減らすことができる。その理由は、同じ車列にある車は、目的地の方向も同じである可能性が高いからである(図2を参照)。



図2: 同一車列内の車の目的地

2.3 優先権制御のデメリット

前のページではメリットについて述べたが、ここではデメリットについて説明する。優先される車がある以上、その車と比べて「後回し」にされる車が存在するのは確かである。青信号で信号を通過する車が、交差方向から優先権を持った車が来たため信号が赤になり停止することになる状況がまさに「後回し」にあたる(図3を参照)



図3：後回しイメージ

図3にあるように、上下方向の車は停止しなければならないが、交差点全体で見ると時間的損失は少なくなる。なぜなら、左右方向の車には必ず自動運転車が含まれているため、ACC等の機能により限られた時間でも多くの車がスムーズに走行できる。また、優先権を持った車が信号を通過すると信号機は数秒で元の点灯色に戻るため、上下方向が停止する時間も最小限に抑えることができる。よって、優先権制御の影響で停止しなければならない車が発生するが、交差点全体では時間当たりの交通量を増やすことができる。

3 シミュレーション環境

本研究はシミュレータ(artisoc, (株)構造計画研究所)を利用して行った。artisocは「マルチエージェント・シミュレーション」を構築するプラットフォームであり、図4のように現実にある現象を仮想的にモデル化することができる。さらに、現象を引き起こす要因をエージェントに置き換え、エージェントに変化を与えることでシミュレーション実験を行える。そして、実験結果をフィードバックし社会現象にアプローチすることができる。

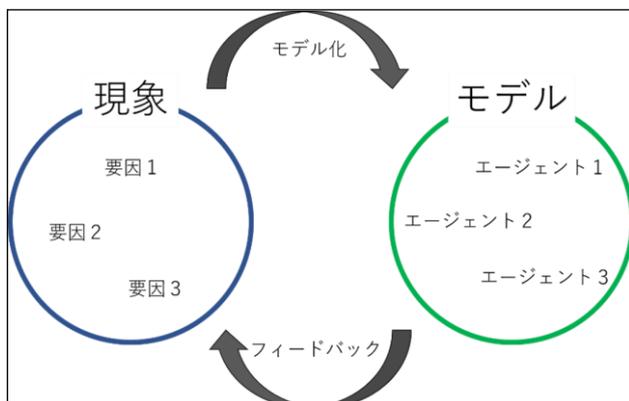


図4：シミュレーションのイメージ

3.1 作成したシミュレーション

artisoc では画面上に「空間」を出力し、その空間上で「エージェント」を動かすことでシミュレーションを可視化する。本研究では街を空間として、3つエージェントが存在する。以下で使用した「空間」と「エージェント」について述べる。

3.1.1 街空間

本研究では 400×200 マスの空間を作成し、空間に表示する背景画像は図5である。図5にある黒枠の四角内は私有地であり、私有地間には片側一車線道路がある。また道路が交差する箇所に信号機を設置する。ここで言う1マスは6mに相当する。

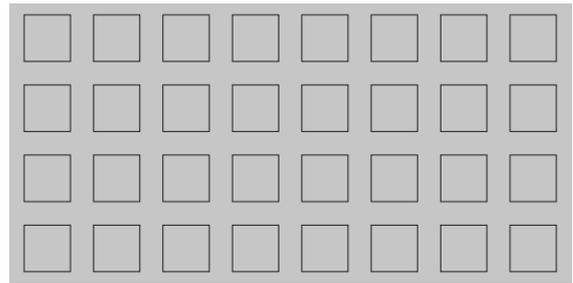


図5：街空間のイメージ

3.1.2 信号機エージェント

先ほど述べたように信号機は道路が交差する箇所全てに設置しており、信号機の点灯色によって車の動きを制御する。点灯パターンの周期は交差点ごとに決まっており、シミュレーション開始時に 280~320step の間で無作為に設定する。また、1つの交差点内の南北と東西方向の信号機の青に点灯する時間の比率を 3~7 割の範囲で分配する。ここでいう step は 0.5 秒に相当する。

優先権制御の影響を受けなければ、信号機は赤と青の点灯時間を繰り返す。しかし優先権を持った車が現れた時は図6にあるように、点灯パターンに割り込みが生じる。その時、信号機内のタイマーが一時停止し、優先権を持った車が通過すると元の点灯色に戻りタイマーが再開する仕組みになっている。

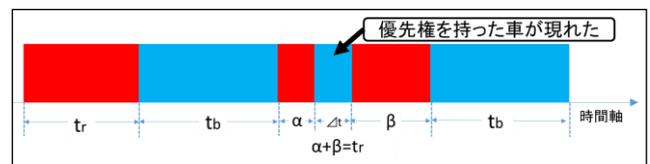


図6：点灯色の割り込み

3.1.2 状況表示エージェント

街の混雑状況を可視化するために、状況表示エージェントを設けた。図7にあるように、各信号機に隣接する道路に存在しており、混雑状況によって「緑→黄→赤→紫→黒」と表示色が変わる。

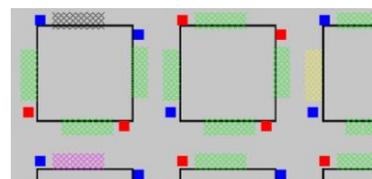


図7：状況表示エージェント

3.1.2 車エージェント

信号機エージェントと状況表示エージェントに最も影響を与えるのが車エージェントであると言える。なぜなら、信号機エージェントの点灯パターンに割り込みを生じさせるのも、状況表示エージェントの表示色を変える要因を作るのも車エージェントだからである。ここではその車エージェントについて説明する。

車エージェントは図 8 にあるように、シミュレーション開始時に座標と目的地を設定し目的地に向かい、到着すると再び再設定する。また、優先権を持った車が走行している間に信号機に近づくと、信号機側が強制的に青になり通過する事ができるが、多方向から優先権を持った車が交差点に進入した場合、先に近づいたほうを青にする。停止している間は、止まっている区間の状況表示エージェントに停止していることを知らせるため、長く多くの車が停止するほど状況表示エージェントが混雑を示しやすい。

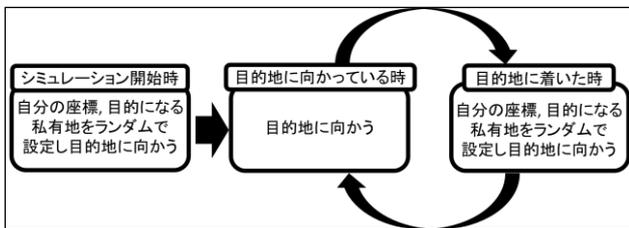


図 8：車の動き

本研究では二種類の車が存在する。それは「人が運転する車」と「自動運転車」である。「人が運転する車」は IT 化されていない従来の車のことでわかりやすいが、「自動運転車」は国が定めている尺度で 5 段階にわけられる。そこで本研究では自動運転車を一意に定義し、人が運転する車と明確に分けるためにそれらの機能特性を定義した(表 1)。

表 1：車の機能特性

	人が運転する車	自動運転車
車間距離(マス)	2~4	2
最高速度(マス/step)	0.8~1.2	1
加速度(マス/step ²)	0.3~0.7	0.5
優先権	扱えない	扱える
ACC	できない	できる
表示色	白	黒

3.2 実験に用いたコンピュータ

マルチエージェントを使用したシミュレーションでは、コンピュータの計算速度によって、実験で扱うエージェントの数や規模が左右されるため、本研究のシミュレーションで使用したコンピュータの仕様を表 2 に示す。

表 2：使用したコンピュータ

コンピュータ	VAIO S13 VJS131C11N
OS	Windows 10 Pro
プロセッサ	Intel®Core™i5-6200U
メモリ	4GB

4 実験条件と検証指標

はじめに述べたように本研究の目的は「優先権制御の有効性の検証」である。そこで優先権制御の有効性を検証するために「優先権制御無し」と「優先権制御有り」の 2 パターンで実験を行った。その際の実験条件と検証指標を以下で述べる。

4.1 実験条件

本研究では信号機の点灯周期や、人が運転する車の加速度等が無作為に設定しているため、同一条件で複数回シミュレーションし、それらを分析する必要がある。そこで 1 つの条件につき 20 回シミュレーションを行った。以下にその条件を示す。

- ・自動運転車の割合：50%
- ・車の台数：300 台
- ・シミュレーションの step 数：10001step
- ・目的地の偏り：あり

作成したシミュレーションでは、上の条件の値は可変であるが、コンピュータの計算速度と時間的要因から、これらの条件でのみ実験を行うこととした。

4.2 検証指標

優先権制御の有効性を検証するために以下の 3 つを指標とした。

4.2.1 時間内平均到着台数

交通システムの目的の 1 つに「多くの人を目的地に運ぶ」ということが挙げられるのではないかと考え、「一定時間ごとに目的地に到着する車の台数」に着目し指標とした。具体的には、500step ごとに目的地に到着した車の台数を出力する。10001step でシミュレーションが終了するため、1 度のシミュレーションで 20 回出力され、同じ条件で 20 回シミュレーションを行うため、1 つの条件につき 400 個のデータが取れる。そして 400 個のデータの平均を取り、その平均を「時間内平均到着台数」とする。さらに優先権制御の有無において有意差があるのか検定を行う。

4.2.2 平均速度

第 1 章で述べたように、車の走行速度によって CO₂ 排出量は大きく変わってくる。それを受け、車の平均速度を指標の 1 つとした。時間内平均到着台数と同様に 500step ごとに平均速度を出力する。しかしここでは人が運転する車と自動運転車の平均速度を分けて出力した。そして出力された平均速度を基に、その条件下での平均速度とその有意差を検証する。

4.2.3 混雑分布

交通渋滞を解消するための手段の 1 つとして「渋滞の分散」がある。渋滞が発生しやすい信号機と、渋滞が発生しにくい信号機を減らして、1 つの信号機に並ぶ車の台数を均一にすることができれば渋滞の発生を抑えることができる。そこで車が停止した回数をその前方にある信号機がカウントし、そのカウント数を基に混雑箇所の分布図を求める。分布図では緑から赤色に近くなるほど混雑が集中していることを示す。

5 結果

まず、検定結果を述べる。以下の検定は「優先権制御無し」と「優先権制御有り」を比較して行われたものであり「」内はp値を示している。

- ・時間内平均到着台数：「1.83332E-78」
- ・自動運転車における平均速度：「3.47811E-34」
- ・人が運転する車における平均速度：「3.44248E-40」

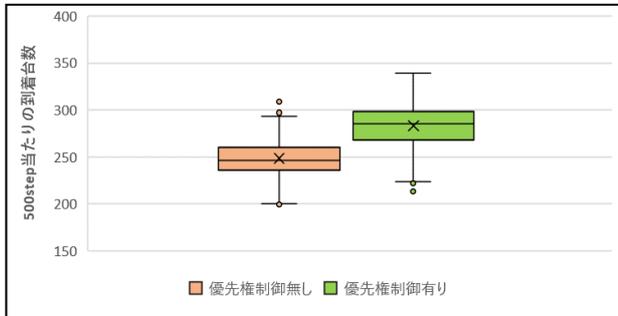


図9：時間内平均到着台数

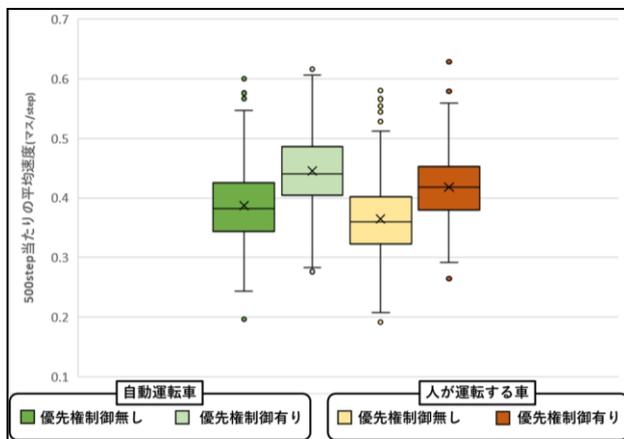


図10：平均速度

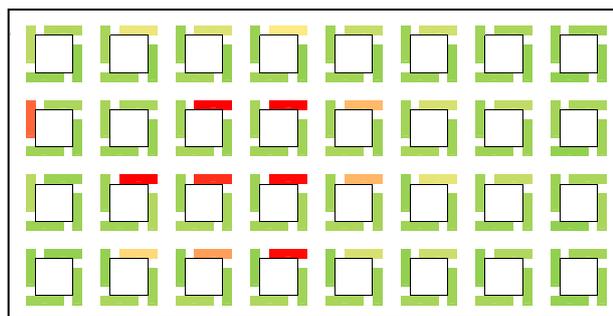


図11：優先権制御無しの時の混雑分布

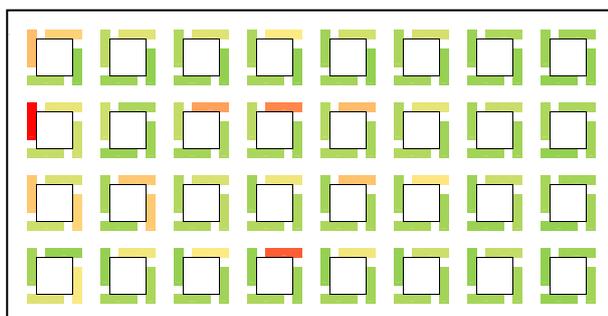


図12：優先権制御有りの時の混雑分布

6 考察

ここでは左の実験結果を基に考察を行う。今回の実験では3つの指標で優先権制御の有効性を行ったため、1つずつ分析していく。

6.1 時間内平均到着台数について

図9からわかる通り「優先権制御無し」と「優先権制御有り」の時間内平均到着台数を比べると「優先権制御有り」のほうが多いことがわかる。また、その有意差が0.05未満であるため、優先権制御によって一定時間内により多くの車を目的地にたどり着かせると証明できた。「優先権制御有り」のほうが多くの車を到着することができた理由としては、優先権制御では混雑している箇所の信号機は優先権によって強制的に青になるため、信号機の点灯パターンが最適化されたからと推測できる。

6.2 平均速度について

図10からわかる通り、自動運転車と人が運転する車は共に「優先権制御有り」のほうが速い平均速度であることがわかる。また検定結果も優先権制御によって平均速度が向上していることを証明している。優先権は自動運転車のみが扱うことができるため、自動運転車の平均速度が速くなるのはあらかじめ推測できたが、人が運転する車にもメリットがあることを確認することができた。さらに図9で時間内平均到着台数が優先権制御有りのほうが多かった要因として、優先権制御有りのほうが平均速度が速いことを挙げられる。

また優先権制御の有無が同じである場合の「人が運転する車」と「自動運転車」の平均速度を比べると、自動運転車のほうが速いことが図10からわかる。人が運転する車では加速度や車間距離にばらつきがあるため、並んで滑らかに走行しているつもりでも減速し車間距離を調整しているからではないだろうか。それに対して自動運転車ならば無駄のない追従走行が可能であるため速度を落とすことなく走行し、平均速度が高くなったと考えられる。

「自動運転車」が「人が運転する車」に比べて走行速度が速くなりやすいことがわかったが、「優先権制御無しにおける自動運転車」と「優先権制御有りにおける人が運転する車」では後者のほうが平均速度が高いことが図10からわかった。

6.3 混雑分布について

最後に図11, 12の混雑分布に着目する。図11の優先権制御無しの場合では中央付近の信号機に混雑が集中しており逆に外側の信号機は基本的に混雑していない。しかし図12の優先権制御有りの場合は、図11に比べると極端な混雑を示す濃い赤が減ってオレンジと黄色が増えていることがわかる。これは優先権制御によって混雑を分散する事ができたことを示唆している。そう考える理由は、優先権制御によって混雑しにくい信号機は赤になりやすいからである。第2章の優先権制御のデメリットでも述べたが、優先権を持った車が交差方向に現れることで、信号が赤になり停止する車が発生する。その停止する車の登場が図12の混雑の分散を可能にしたと考えられる。

以上より本研究の目的であった優先権制御の有効性を「時間内平均到着台数」、「平均速度」、「混雑分布」の3点から示すことができた。

7 おわりに

総括として

渋滞対策は今までは「交通インフラ側」と「車側」の2つに分かれて個別に進化してきたが、それらを強く連帯させ「優先権制御」というルールを設けることで新しい渋滞対策を提案した。そして優先権制御の有効性を検証するために「時間内平均到着台数」、「平均速度」、「混雑分布」に着目し評価分析を行った。シミュレーション結果では、「優先権制御有り」のほうが「優先権制御無し」と比べて時間内により多くの車を目的地にたどり着かせることができ、平均速度も向上させ、混雑箇所も分散させることができ、優先権制御の分散能力の可能性と有効性を示すことができた。

得たこと

本研究を通してさまざまな「気づき」を得ることができた。その気づきの1つに「インフラに関わる技術の影響力の大きさ」がある。前章の考察で述べた通り優先権制御によって500step当たりの平均到着台数が高まることを確認できた。その増加台数は30台程度である。増加率は約13%で一見少ないように思える。しかし、車の台数が多ければ少しの増加率でも変化が大きいのではないかと考えた。京都府の乗用車だけで約100万台存在する。もちろん100万台の車が同時に走行することがないが、それでも多くの車が道路を走行している。このことから、たとえ13%の増加率でもインフラに関わる13%となると大きな影響が出ると気付いた。

前にも述べたが、走行速度の向上による利点は多岐にわたる。その走行速度を優先権制御では向上させることができるため、優先権制御は自動運転車に極端に優しいシステムではなく環境にも優しいシステムといえると思われる。

図11,12を比較してわかるとおり、優先権制御には混雑の分散を行う傾向がある。混雑の分散は単に全体の到着台数を上げるだけではなく、交通事故が起きた時のリスクの分散も大きなメリットとなる。もし車が集中して道路で交通事故が起こり通行不能となった場合、車が集中しているためそこから抜け出すのに時間がかかってしまう。また極端に混雑している場合は緊急車両の走行も困難になり処置が遅れる可能性も出てくる。したがって混雑の分散は交通システムの重要項目であるといえる。

将来展望

自動運転車と信号機の間「優先権制御」という原則を設けることで、優先権制御と直接関わりがない「人が運転する車」の走行速度が速くなることがわかった。本研究では、優先権制御の実現の手段として自動運転車をシミュレーションに導入したが、「自動運転車」と「人が運転する車」が共存する中で互いがどう影響を及ぼすか検証するのも興味深いと考えた。

また自動運転車の割合の増加とともに優先権制御の効果は大きくなると推測している。その理由は、より多くの車が優先権を持ち、それらが別々の目的地に向かうことで広い範囲に影響を及ぼすことができるからである。自動運転車の割合が少なくとも多少の効果はあると思うが、自動運転車の割合の増加に対して指数関数的に優先権制御効果が表れると考えている。

謝辞

本研究を行うにあたって指導して下さった下原勝憲教授と Ivan Tanev 教授に心より感謝申し上げます。お二人に相談することで研究に関する考えを広げ深めることができました。先生方から学んだことを活かし、精進して参りたいと思います。本当にありがとうございました。

参考文献

- 1) 国土交通省 基本方針に関するデータ (H26)
<http://www.mlit.go.jp/common/001098855.pdf>
- 2) 国土交通省 効果的な渋滞対策の推進 (H17)
<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-perform/h18/07.pdf>
- 3) 一般社団法人 日本自動車工業会 自動車産業の現状 (H24)
<https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/special/tenken/04/shiryo08.pdf>
- 4) 国土交通省 渋滞の現状と施策体系
<http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/tm/Top03-01-01.html>
- 5) 国土交通省 運転技術支援・自動運転技術の進化と普及 (H29)
<http://www.mlit.go.jp/common/001213451.pdf>
- 6) マルチエージェントモデルによる自律的信号機制御システムの構築 (H19)
<https://doi.org/10.11517/pjsai.JSAI08.0.333.0>
- 7) エコロジーのための ITS 技術 (H13)
<https://www.denso.com/jp/ja/innovation/technology/dtr/v07/dissertation1-i.pdf>
- 8) GreenSwirl:車両走行効率向上を目指した信号制御および経路案内方式 (H26)
https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/index.php?action=pages_view_main&active_action=repository_action_common_download&item_id=105000&item_no=1&attribute_id=1&file_no=1&page_id=13&block_id=8