

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26540167

研究課題名(和文)生命創発型の汎用交通制御アルゴリズムの開発

研究課題名(英文)Development of bio-inspired general purpose for traffic control algorithm

研究代表者

岩崎 哲行 (IWASAKI, Akiyuki)

九州大学・先端融合医療レドックスナビ研究拠点・特任助教

研究者番号：60643806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：自動車数の増加により都市部では深刻な交通渋滞が慢性化している。対策として有効な道路の拡張はすでに限界に達しており、現状の資産を最大限に利用できる技術が求められている。この問題への対応として細胞内代謝経路からヒントを得た交通要素が自律的に負荷分散を行うシステムを設計し、その有用性を検証した。

その結果、設計した制御アルゴリズムは交通ネットワークで使用されていない車線に対し車両を振り分けることでネットワーク全体の負荷を分散化させ、障害が発生した場合でも効率的な経路制御を行うことが示された。また、信号タイミング決定にも同様の手法を適用しその有用性が確認できたことから、提案手法の汎用性についても示した。

研究成果の概要(英文)：Due to the increase of number of cars, serious traffic congestion has been getting chronically heavy in urban areas. As a measure, effective road widening left nothing undone, and now, the method to maximize current resources utilization is required. To solve the matter, we developed an autonomous traffic load distribution system which mimics the control mechanism of metabolic pathway in the cell, and verified its usefulness.

As a result, the algorithm decentralize the loads on traffic network by allocating vehicles to the lane which is not sufficiently used on the network. Moreover, the algorithm shows efficient path control when traffic incident occurs.

The proposed method can be said having generality since it also adapted to signal control.

研究分野：ネットワーク制御工学

キーワード：交通制御アルゴリズム 自律分散制御 負荷分散 生命創発

1. 研究開始当初の背景

我が国の自動車保有数は増加の一途をたどり、特に車両が集中する都市部では深刻な交通渋滞が慢性化している。交通渋滞の弊害としてアイドリング増加に伴う大気汚染物質や地球温暖化ガスの排出量の上昇、また大規模災害時の緊急車両の通行障害などの問題が挙げられ、交通渋滞の解消は社会的な急務となっている。交通渋滞への対策として、現在までに様々な方法が提案されているが、それらを大きく分類するとハード・ソフト対策と分類することが出来る。ハード対策とは都市計画の一環として車両が通行する道路の新設・増設・改修によって交通網が持つ交通容量(車両を一定時間内に通行させることが出来る能力)を増加させる手法である。一方、ソフト対策は信号のタイミングや交通情報の収集を行い、それらの交通情報を用いて車両または運転者に対してサービスを提供することで渋滞解消を目指すものである。つまり、ソフト対策とは現有資産の交通容量を最大限効率的に利用する手法を提供および提案する。例えば、交通が集中する場所への車両乗入れを制限するパークアンドライドや車両の混雑度によって通行料金を徴収するロードプライシングと言った手法が該当する。ハード面からの交通対策は道路の交通容量を新たに作り出すことが可能なため、交通渋滞に対して非常に有効な手法であるが、人口密集地では土地の確保が難しく、また大規模な改修が必要なため、費用・時間的な観点から容易に適用することは出来ない。これらの理由から、現有の道路資源を最大限有効に活用するためのソフト的対策が現在求められている。そこで我々は現在の交通システムが道路ネットワークの交通容量を全て使い切れていないと考え、使用していない道路資源に対して自律的に車両を振り分ける動的経路制御方法の構築の着想に至った。

動的な経路制御方法を構築するに当たり、我々は生体内の代謝制御機構へ目を向けた。生物の細胞内では、無数の化学物質が生成と消費を繰り返している。それらのプロセスは進化によって獲得され、巨大なネットワーク(代謝経路)を構成している。その制御系は常に外部からの予期しない摂動を受ける開放系であるにもかかわらず、系全体の恒常性を自律的に保っている。加えて、物質を過不足無く生産し、ネットワークを効率的に運用している。これらは階層的なネットワーク構造と多重補償機構を備えた物質制御により実現されている。我々はこれまでに、生体内ネットワークの構成要素とその制御、情報通信網の構成要素であるパケットとルーティングアルゴリズム制御の間に存在する共通性に着目し、生体内制御機構を情報通信ネットワークの制御に移植することで、新たな制御方法の設計を行い、生体内機構の持つ優れた多重補償性を通信ネットワーク上で実現することに成功した。

2. 研究の目的

代謝経路と道路交通網の制御に着目すると、各系に共通性が存在する。図1に示すように代謝経路、および道路交通網制御はネットワーク内部を流れる構成要素に対して経路指示することで系を維持していると考えることが出来る。その制御の目的はトラフィックの解消である。代謝系では意図しない外乱が発生した場合でもそれぞれの制御点が自律的に動作することで無数の化学物質を安定的に処理する分散制御を行っている。本研究の目的はそれぞれの系の共通性に着目し、生命内制御を道路交通網に対して導入することで、生命の持つ優れた機能を道路交通網制御にて実現することである。具体的には道路を通行する車両に対してナビゲーションによる経路制御を行い、車両の一極集中によるトラフィックを解消しネットワーク全体を利用して車両を通行させることによって現有の道路資産を最大限効率的に活用する手法について提案する。また、ナビゲーション以外の交通制御要素にも生体内制御を導入し、提案手法の汎用性を示す

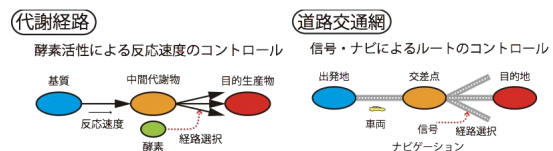


図1 代謝経路・道路交通網の経路制御概念図

各ネットワークの構成要素は代謝経路では基質と生成物、道路交通網では車両である。また、それぞれの制御は酵素活性の調整、車両への経路指示となる。

提案する手法の設計、および評価は以下のように行う。

- (1) 道路交通網制御への生命制御の導入
生体内制御の一つである酵素フィードバック制御を道路交通網のナビゲーション制御に導入し、車両に対して経路指示を行うアルゴリズムを設計する
設計したアルゴリズムが生体内制御と同様に負荷分散・耐障害性を有しているかの検証を行い、設計した制御の優位性を示す
設計したアルゴリズムの内部要素が道路状況に応じてどのような変動を行っているかを観察し、状況に応じたアルゴリズムの使用方法について検証を行う
- (2) 生体内制御導入手法の汎用性検証
交通制御要素の一つである信号タイミングの決定に酵素フィードバック制御を導入する
設計した信号タイミング制御の効果を測定し、その制御の優位性を示す

3. 研究の方法

生体内代謝制御の一つである酵素フィードバック制御(生成物阻害)では基質から生成物を作り出す速度を生成物の濃度によってコントロールしている。図1で示した共通

性を用いて、本研究では図2のように代謝制御と交通網制御の対応を行った。

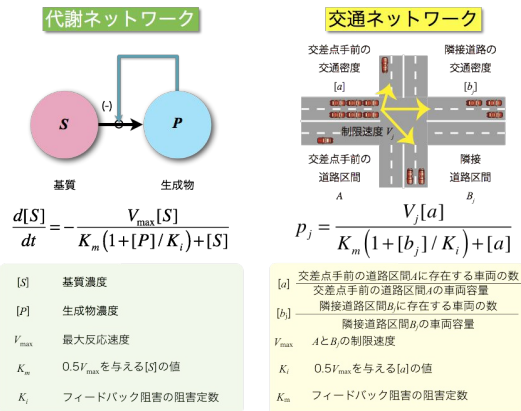
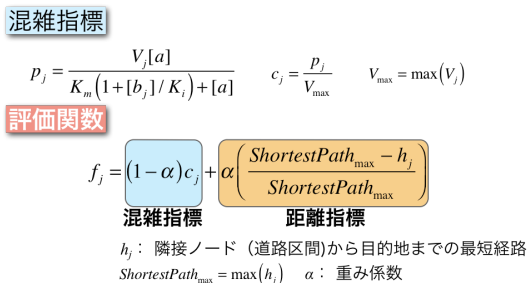


図2 代謝・交通ネットワークとその制御の対応

図2において、基質濃度[S]は制御点となる交差点手前の道路区間の車両密度[a]（ある道路区間に存在する車両数/車両容量）また生成物濃度[P]は進行方向である隣接する道路区間B_jの車両密度[b]_jとそれぞれ対応する。そして、反応速度Vを道路間の制限速度V_j（最大のものをV_{max}とする）と対応させる。生化学的に拮抗阻害反応式は、一定以上の生成物が生産された場合（[P]の値が大きくなる）に[P]の濃度が上昇することでその値が酵素活性（d[S]/dt）に影響し、自律的に生成物が過剰に生産されることを防止している。このことから、代謝制御と交通制御を対応させることで得られたp_jの値は隣接する道路の混雑度と表現できる。定義によりp_jの値が小さいほど隣接する車線が混雑していること示す。代謝経路内での制御は原則として基質と生成物の二点間の帯域制御である。この制御の連続作用が系全体の制御となって現れる。つまり、フィードバック制御によって構成要素間制御を行いながらそれぞれの構成要素による相互作用により全体の均衡を保つシステムである。拮抗阻害反応式を車両経路制御に導入することによって中央集権型制御のような莫大な計算資源を必要としない、要素間での分散制御が可能となる利点も生まれる。

次に図2で示した混雑指標を用いて交通ネットワーク上で経路制御を行うアルゴリズムについて図3に示す。



f_jの値が最も大きい経路をアルゴリズムは選択

図3 経路制御アルゴリズム (AA)

設計した経路制御アルゴリズム (Adaptive Algorithm: AA) は交差点に車両が到着すると評価関数 f_j を計算する。進行方向別に f_j が計算され、経路候補の中で f_j の値が最も大きい経路に対して車両への経路指示を行う。評価関数右辺第一項は混雑指標 p_j を正規化した値を示し、第二項は目的地までの最短距離の度合い（距離指標）を示す。距離指標は隣接道路の混雑度があまりにも多い場合に混雑指標の影響が強くなり同じ経路を重複して通行してしまう恐れがあるため、その抑制として導入を行った。なお、距離指標は目的地までの最短経路を考慮するため、車両の最終目的地への到達可能性は保証されている。

設計したアルゴリズムを評価するためにシミュレーションによる検証を行う。道路交通シミュレーションに用いたソフトウェアは TSS:Transport Simulation Systems 社が開発・販売を行っている総合交通シミュレータ Aimsun 8.0.9 (R35843 x64)を採用した。Aimsun は外部からシミュレータ内部を操作することが出来る API を提供しており、シミュレーション中の車両に対して直接その進行方向を変更することが可能である。シミュレーションの対象となる交通ネットワークを図4に示す。

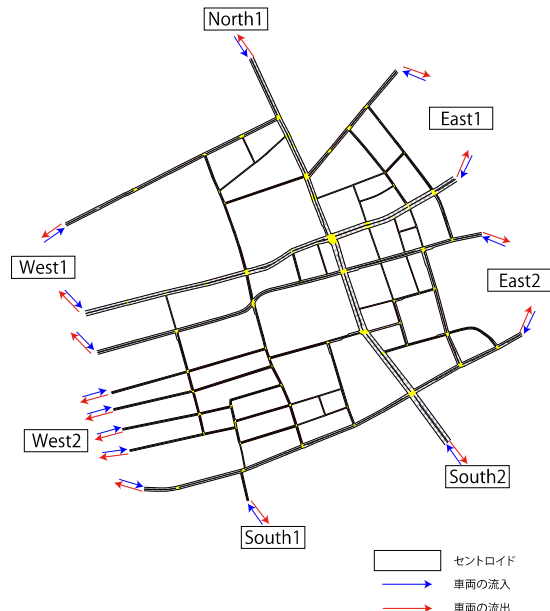


図4 シミュレーションネットワーク (福岡市天神地区)

シミュレーション対象のネットワークとして、福岡市の中心部である天神地区の交通網を利用した。天神地区は時間帯によって激しい交通集中が発生する地域である。図4中ので囲った部分はセントロイドと呼ばれ、車両の流入および流出が行われる。これらの台数設定は福岡市の交通量調査を参考に決定し、その流入、および流出は O/D (Origin / Destination) 表にて定義した。加えて、設計アルゴリズムの耐障害性の評価のために、図4のネットワークの一部に意図的に障害を発生させ、その対応状況について観察した。

その発生条件は設計アルゴリズムの性能を見極めるため、道路ネットワークに大きな負荷がかかる条件とした。アルゴリズムの評価の際に利用する指標は次の通りである。

- (1) DelayTime(sec/km) : (シミュレーション中に車両が実際に目的地に到達するまでにかかった時間-理想状態で走行した場合の走行時間)/ネットワーク内車両の全走行距離
- (2) Vehicle Inside(veh) : シミュレーション終了時にネットワーク内に残った車両の総数
- (3) Vehicle Outside(veh) : シミュレーション終了時にネットワーク外に出た車両の総数
- (4) Vehicle Wait (veh) : シミュレーション終了時にネットワーク内に進入出来なかった車両の総数

また、生体内制御導入手法の汎用性検証のために信号のタイミング決定に経路制御アルゴリズムと同様の拮抗阻害反応式を導入する。設計した信号タイミング決定アルゴリズムを図5に示す。

信号交差点において進行方向ごとに $f([a],[b_i])$ 値を計算

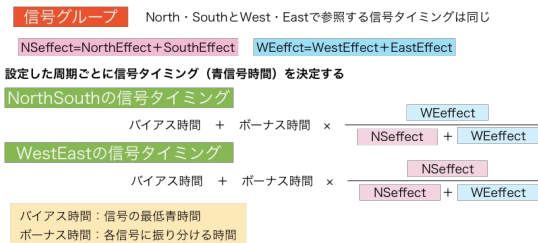
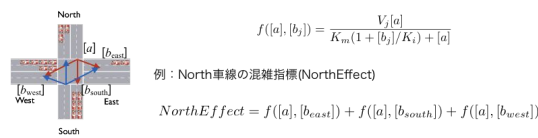


図5 信号タイミング決定アルゴリズム

南北方向と東西方向に伸びる車線が交差する信号交差点があった場合、それぞれの車線から進入する車両が参照する信号タイミングは原則同じである。このため、混雑指標(NorthEffect・SouthEffect・WestEffect・EastEffect)をそれぞれ計算し、東西・南北グループのそれぞれの和を取ることで各方向の統合混雑指標(NSeffect・WEeffect)を定義する。これらの値が小さいほどそれぞれのグループが通行している車線が混雑していることを示す。提案アルゴリズムの設計思想は混雑車線の青時間を大きくすることを目的とする。また、青時間・赤時間信号のタイミングはそれぞれ表裏関係であり、これらの関係から、設計したアルゴリズムは交差する車線の混雑度を用いて信号タイミングの決定を行う。例えば南北方向の車線が東西方向の車線と比較して混雑している場合には、NSeffectの値がWEeffectよりも小さくなる。よって、信号決定のタイミングにWEeffectを利用することで青時間信号の延長を行う。

4. 研究成果

(1) 道路交通網制御への生命制御の導入

設計した経路制御アルゴリズムの性能評価のために車両が最短経路を走行するSPA(Shortest Path Algorithm)を比較対象アルゴリズムとして採用した。また、提案アルゴリズムの負荷分散および耐障害性の評価を行うために、シミュレーション中に意図的に障害を発生させ、その事象への対処について観察した。障害条件を図6に示す。

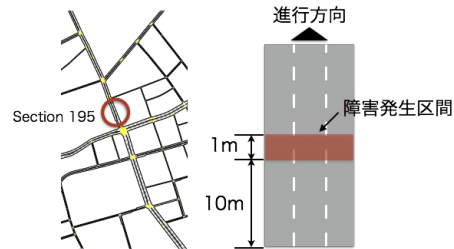


図6 アルゴリズム評価のための障害発生条件

シミュレーション時間は一時間とした。混雑指標に用いた関数のパラメータは $K_m=0.09$ 、 $K_i=0.015$ である。また、障害の発生はシミュレーション開始時より10分後に行い、その期間は10分間とした。図7にSPA・AAのDelayTimeの時間的変化を示す。また、それぞれのアルゴリズムの評価指標を表1に示す。

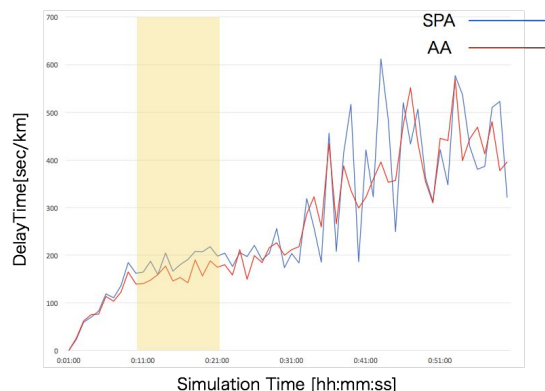


図7 各アルゴリズムにおけるDelayTimeの変化：図中の黄色の で囲った範囲は障害の発生中を示す

表1 評価指標

	SPA	AA
Average DelayTime [sec/km]	289.24	285.64
Vehicles Inside[veh]	2299	2825
Vehicles Outside[veh]	7700	8197
Vehicles Wait[veh]	2365	1342

図7より各アルゴリズムともシミュレーション時間が後期になるにしたがいDelayTimeの上昇が観察された。しかし、SPAに比べてAAはその分散が低下している。また、AAの評価指標において、ネットワークへの流入および流出量がSPAと比較して大幅に増加している。以上より同一のネットワークにおいて経路制御の方法を変更することによってネットワーク全体の負荷を減少させることが確認された。また、ボトルネックが存在する

ネットワークでの実験結果であることから SPA と比較して耐障害性を持つことについても示された。

AA は既存のネットワーク資産の中で使用していない道路を利用することで処理能力を向上することを設計思想としている。その効果の確認のため、車両の通過する道路の使用状況について調査を行った。図 8 に SPA、および AA のネットワーク内の車線 (Section) 利用数の推移を示す。また同時に評価関数内の重み係数を変動させた場合に Section 通行回数がどのように変化するかについても示す。この値は評価関数が経路指示を行う際に、混雑度・目的地までの距離のどちらを重点的に考慮するかを決定する係数であり、この値が小さいほど混雑指標の影響が経路選択に大きく影響を与えることになる。

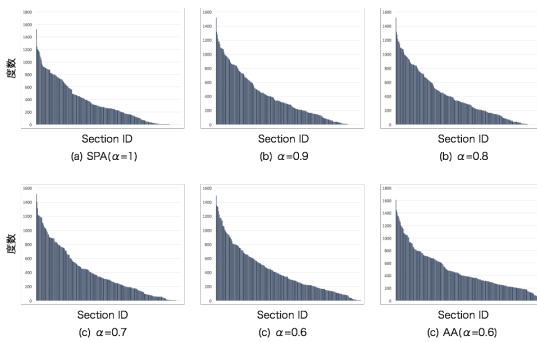


図 8 アルゴリズムによる車両の Section 使用率の変化

図 8 より AA で制御されている交通ネットワークにおいて、使用 Section の数が増加していることが確認された。この結果より、AA が特定の道路を通行する車両に対して他の道路への経路指示を行い、負荷の分散を図っていることが示されている。また重み係数を変動させることによって車両が通行する道路の種類が減少に従い増加していることも確認された。SPA の動作は距離指標しか参照を行わないため、 $\alpha=1$ と同義である。 α が減少すると混雑指標の参照度が増加し、別の経路に振り分けられる率が上昇する。そして、その車両台数が減少に従って上昇するために、ネットワーク全体の道路使用率も上昇したと考えられる。以上から、提案したアルゴリズムは渋滞が発生している道路から使用されていない道路に対して車両を振り分け、一局に集中する車両混雑を解消することによってネットワーク全体の負荷を分散化させていることが証明された。

加えて、さらなるアルゴリズムの調整を行うために、混雑指標内のパラメータについて検討を行った。具体的にはパラメータ K_m に着目し、その変動による効果がネットワークに及ぼす影響について調査を行った。 K_m の値は混雑指標の計算において入力と出力の感度に相当するパラメータであり、この値を小さくすることによって入力に対する応答性が向上する。図 9 に K_m を変更した場合の混雑指標関数の変化を示す。

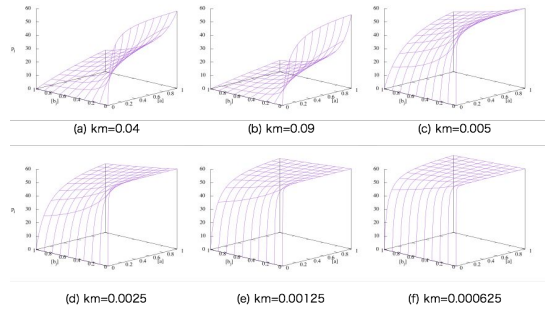


図 9 混雑指標の K_m 変化による応答性の変化

これらの K_m 値を用いて先に述べた実験と同様の条件でシミュレーションを行った結果を図 10 に示す。 K_m 値以外の実験条件は同様である。

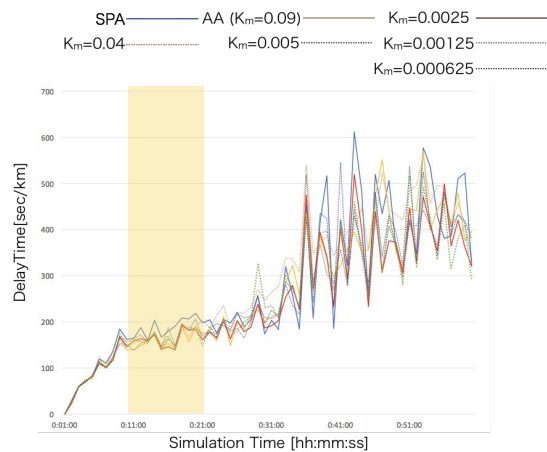


図 10 K_m 変化時の DelayTime の変化：図中の黄色の囲った範囲は障害の発生中を示す

表 2 K_m 変化時の評価指標

K_m	Average DelayTime [sec/km]	Vehicle Inside [veh]	Vehicle Outside [veh]	Vehicle Wait [veh]
-(SPA)	289.24	2299	7700	2365
0.04	309.56	2990	7744	1630
0.09(AA)	285.64	2825	8197	1342
0.005	272.44	2169	8768	1427
0.0025	266.86	2061	8920	1383
0.00125	270.22	2303	8730	1331
0.000625	280.61	2295	8694	1375

図 10 より K_m の値を小さくすることによって DelayTime が減少していることが確認できる。また、評価指標は K_m の値を小さくすることで、AA よりもより多くの車両をネットワークで処理出来ることを示している。特に $K_m=0.0025$ の時は SPA・AA と比較して DelayTime が大幅に改善している。また、ネットワークへ入力・出力された台数について考慮すると他の制御方法と較べて、一時間当たり 1000 台以上の処理能力の向上がみられ、混雑指標内のパラメータを変更することで非常に効果的な経路選択制御が出来ることが明らかとなった。また、 K_m の値を小さくしすぎると逆に制御の効率が低下することも示された。以上より実ネットワークで提案アルゴリズムを実装する際にはネットワークの状況に応じて調整を行う必要があると考

えられる。

(2) 生体内制御導入手法の汎用性検証

汎用性の検証のため、交差点における信号タイミングの決定に(1)で用いた拮抗阻害反応式を用いて図5で示した信号タイミング決定アルゴリズムをシミュレータに導入し、実験を行った。制御対象とした信号交差点を図11に示す。

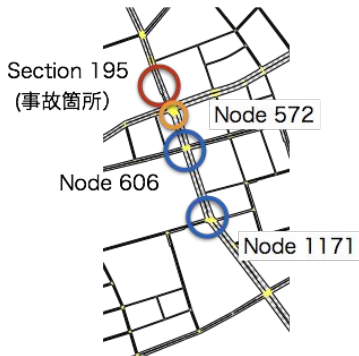


図11 信号交差点

シミュレーション実験の条件は先の実験と同様である。また、信号タイミングの決定に利用するパラメータは $K_m=0.09$ 、 $K_i=0.015$ とした。制御を行う信号交差点(Node)は図11に示した606と1171である。信号タイミングの更新時間は5分とした。比較対象の制御アルゴリズムはSPAである。実験結果を図12に示す。また各評価指標について表3に示す。

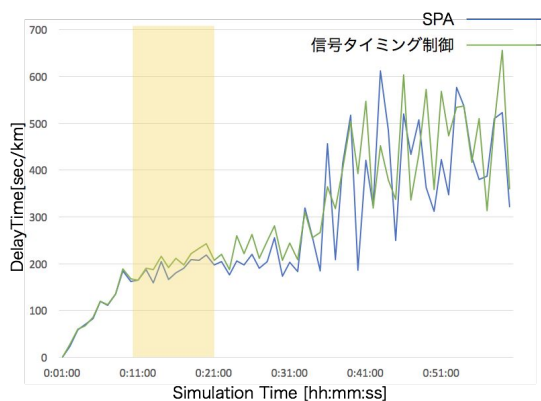


図12 DelayTimeの変化: 図中の黄色の で囲った範囲は障害の発生中を示す

表3 評価指標

	SPA	信号タイミング制御
Average DelayTime [sec/km]	289.24	319.21
Vehicles Inside[veh]	2299	1803
Vehicles Outside[veh]	7700	8032
Vehicles Wait[veh]	2365	2529

SPAと比較すると、信号制御を行った場合に、DelayTimeが悪化する結果となった。しかしながら、シミュレータの仕様からDelayTimeは目的地に到達した時点で計算が行われる。つまりシミュレーション終了時にネットワーク内にとどまる車両が多い場合にはその状況が数値としてあらわれない場合がある。その証拠に、表3では信号タイミング制御ではネットワーク内に存在する車両の台数が

減少し、ネットワークの効率が上昇していることが確認できる。以上から拮抗阻害反応式を混雑指標として利用し、それに従い信号タイミングを変化させることで、少数の制御点でネットワーク構造を変更せずに処理効率の向上が可能であることが示された。また、事故を発生させたSection195に隣接する信号交差点(図11における黄色丸: Node572)とそれに隣接する交通量の多い信号交差点(Node606)で信号タイミング制御を行った際のそれぞれの青時間のフェーズごとの推移について図13に示す。

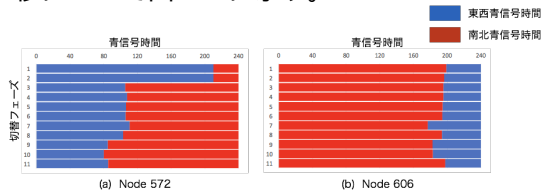


図13 信号交差点における青時間推移

図13よりNode572、606共に事故によって発生した渋滞によって青時間信号が南北方向の車線で長くなっていることが確認できる。実験では意図的に交差点の信号周期を東西・南北でタイミングをずらして設定を行った。つまり、信号の周期が異なるために信号による輻輳が発生する可能性が高い交差点となっている。しかし、導入アルゴリズムによって自動的に青時間間隔を設定する制御が行われ、周期のずれが青時間の増加により解消されていることが確認できる。つまり、信号タイミングの決定に混雑指標の導入することで自律的に信号周期を調整する機能についても獲得できたと考えられる。

本研究では生体内の優れた自律的な負荷分散・耐障害性に目を向け、その制御を交通ネットワークの制御に対して移植を行うことで同様の機能を実現した。また、経路制御と信号タイミング制御それぞれに同様の機能を導入した結果、ネットワーク処理能力の向上がみられ、採用手法の汎用性についても示した。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計1件)

Bio-Inspired Adaptive Control Algorithm for Traffic, International Symposium on Synthetic System Biology Symposium of Biochemical System Theory (BST2015), 2015.09.17-18, The LUIGANS, Fukuoka, Fukuoka City, JAPAN, Akiyuki Iwasasaki, Masahiro Okamoto.

6. 研究組織

(1)研究代表者

岩崎 哲行 (IWASAKI, Akiyuki)

九州大学・先端融合医療レドックスナビ

研究拠点・特任助教

研究者番号: 60643806