

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 22日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21310109

研究課題名（和文） 生命生体渋滞学の創成と通信・交通分野での分散平均化輻輳回避システム設計への適用

研究課題名（英文） Application of Bio-inspired Algorithm to Adaptive Routing of Packets and to Traffic Congestion of Roads

研究代表者

岡本 正宏（OKAMOTO MASAHIRO）

九州大学・大学院農学研究院・主幹教授

研究者番号：40211122

研究成果の概要（和文）：

現在、情報通信ネットワーク、P2P ネットワーク、センサーネットワーク、アドホックネットワークに対して耐障害性、拡張性、自律分散性が求められている。この問題に対して、代謝経路内に数多く存在する酵素反応フィードバック制御による負荷分散機構を情報通信のルート選択のアルゴリズムに導入し、有用性を検証した。その結果、100 ノードから成るスケールフリーのネットワークにおいて、ヘビーな通信流量をもつわずか上位10%のノードを酵素反応フィードバック制御機構を組み入れた適応型ルーティングに変更することで、DoS アタック障害によるパケット転送のふくそうを回避することができた。交通工学分野では、現状の渋滞要因が明確に把握されていないことから、渋滞対策が局所的で、あるエリア全体の渋滞解消に至っていない。また、事故、工事等による通行止めに対応して、エリアネットワークから見て最適な補完ルートを即座に設定すること、および渋滞に応じた信号制御の最適化は困難である。この問題に対して、酵素反応フィードバック制御による Adaptive な負荷分散機構を適用した。特定の渋滞エリア（福岡市天神地区の渡辺通り）の道路の通行止めや車線幅減少などを想定し、従来の信号時間固定のものと、信号を混雑状況によって Adaptive に変化させる場合のシミュレーション結果を比較した。Adaptive な場合は、渋滞状況に応じて、時々刻々の自律的補完ルートの設計が可能となった。

研究成果の概要（英文）：

In the research fields of information & communication network, P2P network, sensor network and adhoc network, how to realize the fault-tolerancy, scalability, autonomous distribution is hot issue. In this research, at the first step, we applied the adaptive and load balancing mechanism by mimicking enzymatic feedback system in cells to the scale-free 100 nodes network, in which a lot of packets are passing through. By changing of top 10% of most heavy traffic nodes to adaptive nodes composed of enzymatic feedback mechanism, the network showed fault-tolerancy against DoS attack.

In the same manner, at the second step, we applied the adaptive and load balancing mechanism of enzymatic feedback system in cells to the traffic congestion control at Tenjin area in Fukuoka-city and optimal signal control of crossings. We simulated the road network at the time of an incident, and showed that the proposed algorithm was highly robust in the network. From these results, we concluded that the proposed algorithm can average the load balance and is highly robust.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2010年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2011年度	2,100,000	630,000	2,730,000
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野： 複合新領域

科研費の分科・細目： 社会・安全システム科学、社会システム工学・安全システム

キーワード： 安全システム、渋滞科学

1. 研究開始当初の背景

情報通信分野では、インフラとしての情報通信ネットワークが急激に普及し、P2P の大容量ファイル転送、情報活用の高度化、情報サービスの進展により、トラフィックは過去 8 年間で約 1000 倍に急増している。予期せぬネットワーク障害と輻輳の頻発はさらにトラフィックを助長することから、現在のように通信速度、通信容量および、最短経路重視の経路制御では、地震などの天災の際にネットワークの効率を急激に悪化し、ネットワークパニックを引き起こしかねない。一方、道路交通分野では、都心部の慢性化した交通渋滞は、信号機 1 台に対するキャパシティの限界にまで達しており、コスト、場所確保の面から道路拡幅は簡単に行えず、隣接する信号機同士の効率的な連携や、都心部地域に流入する車両の動的分散制御（負荷分散を目的とする時々刻々の経路制御）しか残された道はない。近年、東大・院・工の西成活裕准教授らによる「渋滞学」の提唱はこのような背景から行われたものである。ところで、効率的な動的経路制御の設計の最大のヒントとなるものに、細胞内代謝経路（細胞内に存在する生化学反応物質通信ネットワーク）がある。代謝系は常に細胞外からの予期せぬ摂動（食餌等）を受ける開放系であるにも関わらず情報通信、物質供給の恒常性（たとえば血糖値の恒常性）を保っている。その基本は、多重保障で、かつネットワーク全体の load の平均、分散化制御機構にある。我々は、これまでに世界で初めて、「細胞内酵素反応フィードバック制御機構をモデルにした階層型適応ルーティングの設計・開発」を行い、2 つの特許を公開してきた（特開 2007-305025: 生体の原理を用いたレプリカ制御法、およびそれを具備する装置、ならびにそのプログラム、特開 2008-22245: 経路制御方法とプログラムおよびエリア間通信装置とネットワーク経路制御システム）。

2. 研究の目的

インターネット、交通、代謝の 3 つは全く異なる分野であるが、概念的には図 1 のようにネットワーク構造に関して共通点が高め高い。三者とも、トラフィック（渋滞）解消という目的は共通である。さらに、これまでの生物工学とりわけ代謝制御学の研究と、我々の「細胞内代謝フィードバック機構を用いた適応型ルーティング設計」の研究から、

代謝ネットワークトポロジーと細胞内酵素フィードバック制御機構と代謝物質濃度の恒常性の関係がかなり明らかになっている。したがって、本研究の目的は、「生命とりわけ生体内（代謝系、神経系）の渋滞解消アルゴリズムの工学分野での適用」を目指したブレークスルー学問分野の創成、すなわち、「生命生体渋滞学の創成」である。具体的には、通信・交通分野での分散平均化輻輳回避システム設計への適用である。

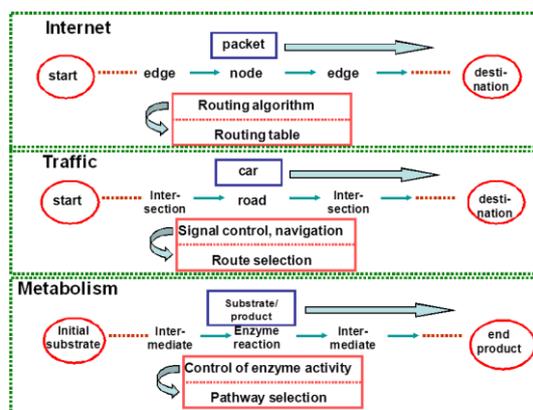


図 1 インターネット、交通、代謝の経路制御の概念図：ネットワーク上を移動するものは、インターネットではパケット、交通では車両、代謝では基質・生成物（化学物質）。経路選択は、インターネットではルーティングアルゴリズム、交通では、信号制御やナビゲーション、代謝では酵素の活性調節である。

具体的には、

- 1) 情報通信工学分野への適用
 - (1) 他の種類の酵素反応フィードバック関数導入の検討
代謝経路内には種々のフィードバック関数が知られているので、関数形と負荷分散能力との関係を明らかにする。
 - (2) ネットワーク上の ADAPTIVE ノードの配置場所と配置数の検討
ネットワーク上のすべてのノードを提案アルゴリズムをもったノード(ADAPTIVE ノード)にすることができないので、有効な配置場所と最小限の配置数を検討する。
 - (3) 混雑指標と距離指標との重み係数を変数にしたときの負荷分散能力の検討
現在、ルート選択の評価関数として、混雑指標と距離指標の両方に重み係数（固定）をかけて加算したものをを用いている。重み係数をパケットの優先度に応じて変化さ

せるようにする。

(4) 階層型ルーティングの設計と巨大ネットワークでの検証

オーバーレイネットワークのようにルーティング設計もいくつかの階層をもったものにして、ネットワークサイズが巨大化しても対応できるようにする。

2) 交通工学分野への適用

(5) 特定の渋滞エリアにターゲットを絞って、時間ごとの交通流調査データを基にした信号機を含むエリア交通流シミュレータを設計する。

(6) シミュレータを用いて、各信号機の渋滞に対する感度解析を行う。キ)シミュレータを用いて、事故による道路通行止め、あるいは車線幅減少に伴う有効な補完ルートを設計する。

(7) カーナビに生物創発 ADAPTIVE アルゴリズムを導入し渋滞解消の円滑な交通誘導法を検討する。

3. 研究の方法

酵素反応フィードバック制御のルーティングアルゴリズムへの適用法を図2に示す。図1において、[a]は送信ノードの送信待ちパケット量、[b]は隣接ノードの送信待ちパケット量、Vをノード間の通信速度（最大のものをVmaxとする）とすると、酵素拮抗阻害フィードバック関数pはそのまま、混雑状況の指標となる。混雑するほどpの値は小さくなる。分岐において、評価関数f（混雑状況指標と最短距離指標（hは送信目的のノードまでのホップ数）の重み付関数）の値が最大の経路が選択される。酵素拮抗阻害フィードバック関数は、生化学的には、[a]は反応原料物質濃度（基質）、[b]は生成物質濃度で、[b]が過剰になると、酵素活性(p)が小さくなることで過剰生成が抑えられる。

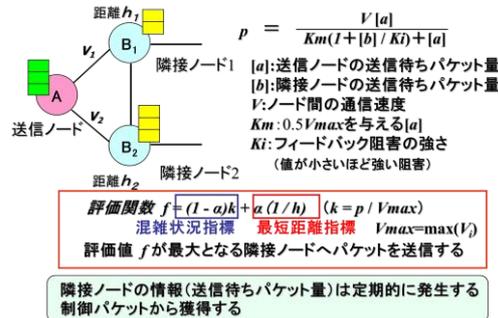


図2 酵素反応フィードバック制御のルーティングアルゴリズムへの適用法 (1)

酵素拮抗阻害フィードバック以外に、様々な関数形が明らかになっており、パラメータ値によって混雑状況指標としている関数kを変化させることができる。

次に、このアルゴリズムを、交通工学分野に適用した場合、図3のようになる。図3において、[a]はターゲットとなる交差点の手前の道路区間での車両密度（道路区間に存在する車両数/道路区間の車両容量）、を与える[a]の値、Kiはフィードバック阻害定数（値が小さいほど阻害が強い）とすると、情報通信分野で述べた混雑指標pjは、図4のように表され、その交差点にさしかかた時に、fjの値に基づいて、fjの値の大きい方向に車両が進むようにする。

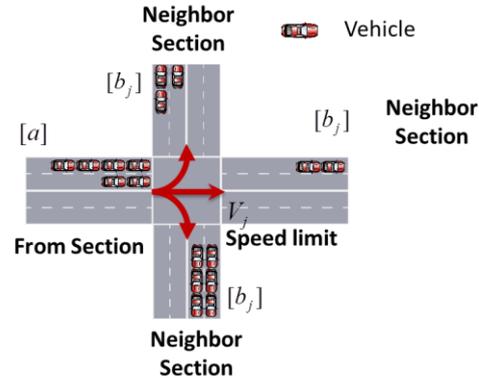


図3 細胞内酵素反応フィードバック制御機構の交差点車両進行方向選択アルゴリズムへの適用法

[a]: 交差点手前の道路区間 A での車両密度 (交通密度)

[bj]: 隣接道路区間 Bj での車両密度 (交通密度)

Vj: 車両制限速度

提案アルゴリズム(ADAPTIVEアルゴリズム)

混雑指標

$$p_j = \frac{V_j[a]}{K_m(1+[b_j]/K_i)+[a]} \quad c_j = \frac{p_j}{V_{max}} \quad V_{max} = \max(V_j)$$

評価関数

$$f_j = (1-\alpha)c_j + \alpha \left(\frac{ShortestPath_{max} - h_j}{ShortestPath_{max}} \right)$$

混雑指標 距離指標

h_j : 隣接ノード (道路区間)から目的地までの最短経路
 $ShortestPath_{max} = \max(h_j)$ α : 重み係数

f_j の値が最も大きい経路をアルゴリズムは選択

図4 適応型交差点車両進行方向選択アルゴリズム (ADAPTIVE アルゴリズム)

車両が交差点にさしかかた時に、評価関数 fj が各進行方向別に計算され、fjの値が最も大きい進行方向（経路）が選択される。評価関数 fjの右辺第1項は、混雑指標を第2項は目的地までの距離指標を表す。混雑指標pjは、細胞内酵素反応フィードバック制御機構をミックスしたもの。

4. 研究成果

(1) 情報通信工学分野への適用

これまで、混雑状況の指標として、酵素拮抗阻害フィードバック式を適用していたが、新たに、non-essential activation式(図4)を適用し、その有用性を検証した。

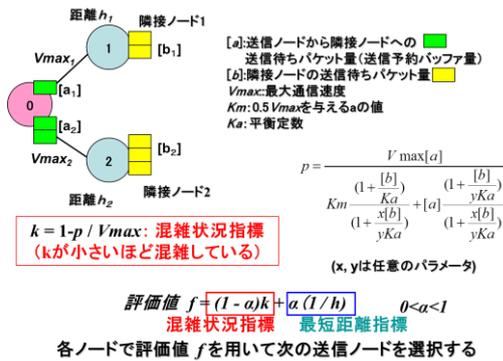


図4 酵素反応フィードバック制御のルーティングアルゴリズムへの適用法 (2)

バラバシールバートモデルによって生成したスケールフリーネットワーク構造を持つ100個のノードからなるネットワークで、広く用いられているルーティングアルゴリズムのSPF (shortest path first) と SPF+ECMP (equal cost multi path) と提案アルゴリズム (adaptive routing, AR) を用いて、大規模ネットワーク障害実験を行った。すべてのノードから自ノードとランダムに異なるノードにパケットを送受信させた。データパケットサイズは1024B、合計11329個、パケット発生間隔は120 μsec、すべてのノード間の送信速度は、100Mbps とした。また、ネットワーク障害として、時刻10000 μsecに、19か所の経路において、100Mbps から50Mbps へ通信速度を減少させた。上記3つのルーティングアルゴリズムのパケット処理能力を検証した結果を、図5、6、7に示す。図中の破線は、ネットワーク障害発生を示す。

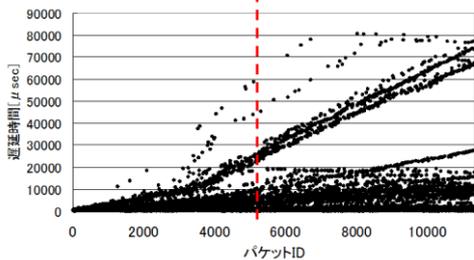


図5 SPF の場合の packet 遅延時間推移

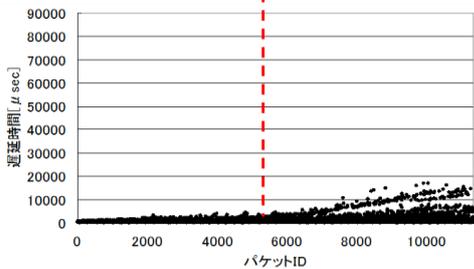


図6 SPF+ECMP の場合の packet 遅延時間推移

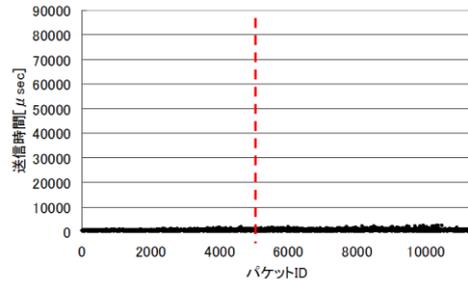


図7 提案アルゴリズム (AR) の場合の packet 遅延時間推移

これまでの、すべてのノードに対して提案アルゴリズム (AR) を適用してきた (以下、ADAPTIVE と呼ぶ) が、障害の発生前、発生中、回復後において通信頻度が激しいノードに対してのみ AR を適用するように想定した。DoS アタックが10か所に10000 μsec ~ 20000 μsec 間に起こり、通信速度を半減させた。20000 μsec 以後は正常に回復したと想定した。発生前、中、回復後において、通信頻度の激しいノードが、各々、5、12、10個あるので、そのノードに対してのみ AR を適用した場合を selected ADAPTIVE とし、ECMP、ADAPTIVE、selected ADAPTIVE の packet 遅延時間推移を調べた。その結果を図8、9、10に示す。図において、□で囲んだ時間帯が障害発生時間帯である。

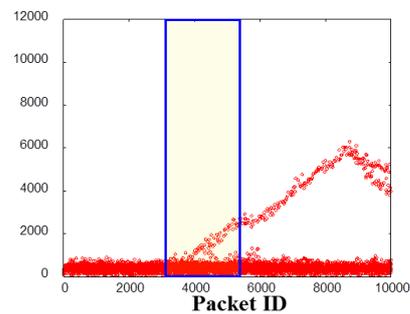


図8 SPF+ECMP の場合の packet 遅延時間推移

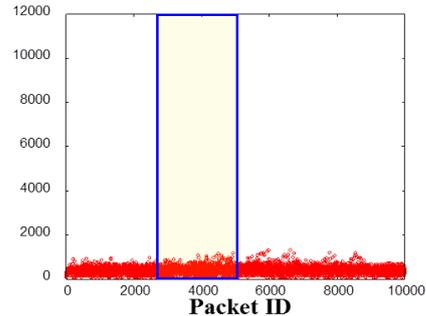


図9 ADAPTIVE の場合の packet 遅延時間推移

図9、10から明らかなように、100ノードのうち、5から12ノードをARにするだけで、すべてのノードをARにする場合とほぼ同等の packet 処理能力を有することが明らか

になった。

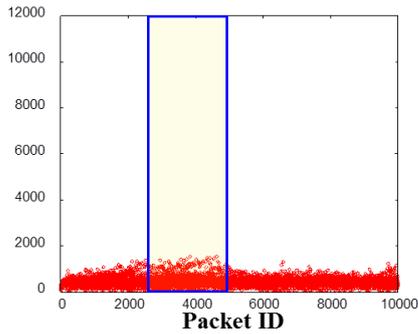


図 10 selected-ADAPTIVE の場合の packets 遅延時間推移

AR においては、各ノードが経路を判断するために、混雑状況によってネットワークに滞留する packets が発生する。したがって、packets が送信目的ノードに到着する時間が閾値を超えると、混雑指標と距離指標との重み係数 (図 2、4 の α) を変数にし、大きくするように想定した。 α を大きくすることは、距離優先に切り替えることと同意である。そのときの負荷分散能力を検討した結果、ネットワークに長く滞留する packets の割合が、同一実験条件で、 $\alpha=0.7$ の場合が、10.17% であるのに対して、 $\alpha=0.7\sim 0.9$ (可変) の場合が、1.77% となり、重み係数を可変にすることの有用性が明らかになった。

また、階層型ルーティングの設計についても検討し、図 11 のような階層型ネットワークにおいて、エリア層とノード層それぞれにおいて、AR を用いた経路制御を行うことによって、複数のノード間の DoS アタックに対しても、頑強性を示すネットワークを構築できた。

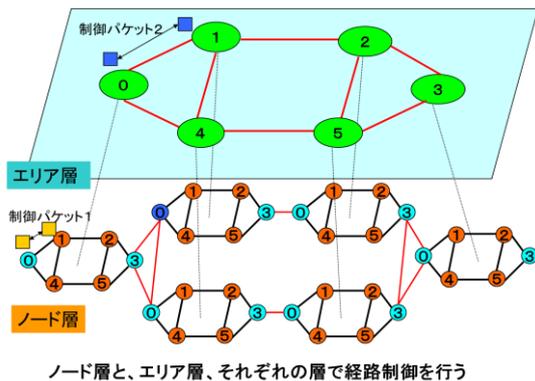


図 11 階層型適応ルーティングネットワーク

(2) 交通工学分野への適用

提案した交通制御アルゴリズムの性能を検証するために、道路交通シミュレータを用いてアルゴリズムの性能評価を行った。道路ネットワークのシミュレーションのために

道路交通シミュレータを用いて実験を行った。使用したシミュレーションソフトは TSS Transport Simulation Systems が開発・販売している総合交通シミュレータ Aimsun version 6.1.2 を用いた。交通シミュレーションの対象となる道路として福岡県福岡市の中心部にある中央区天神地区を採用した (図 12)。天神地区は福岡市内で最も交通量の多い地区であり、時間帯によって非常に大きな交通渋滞が発生する。7 つのセントロイドを想定し、各セントロイドで調査された OD 表に基づいて車両を各セントロイドから流入、流出させる。

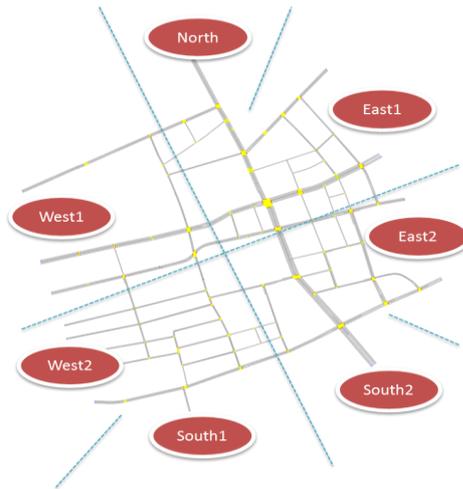


図 12 福岡市天神地区の道路概略図。楕円はセントロイドを表す。

提案アルゴリズム (AA) と SPF (shortest path first) アルゴリズム (SPA) で比較した。各々のアルゴリズムを用いた場合の車両到着遅延時間推移 (目的セントロイドまでの到着時間の平均を単位 km あたりの秒数に換算) を図 13 に示す。

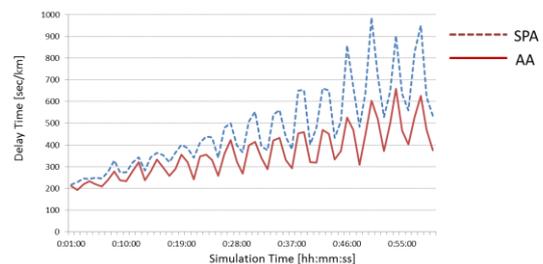


図 13 車両到着遅延時間推移。AA (実線) は提案アルゴリズム、SPA (破線) は SPF アルゴリズム。

図より、提案アルゴリズムに基づいて各車両が目的セントロイドまで到着する方が有効であることは明らかだが、すべての車両のカーナビに提案アルゴリズムを入れ込むことには無理があるので、次に、天神地区の中央幹線道路である渡辺通りにある信号の中で、5 つを取り上げ (図 14)、この信号機の赤・

青切り替え時間を AA に基づいて変動させることを想定し、シミュレーションを行った。

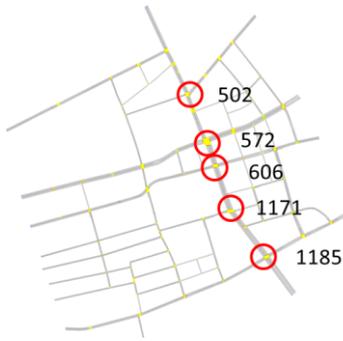
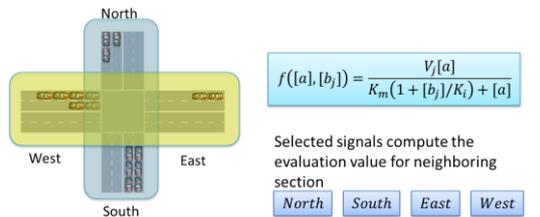


図 1 4 渡辺通りの 5 つの信号機

信号機の切り替え時間の調節は、図 1 5 のように行う。



Ex. The evaluation value of North Section

$$\text{North} = f(\text{density of North, density of East}) + f(\text{density of North, density of South}) + f(\text{density of North, density of West})$$

Timing of selected signals set to as follows:

Classify the signals into two pattern under the direction



$$\text{Signal timing of NorthSouth} = 120 \times \frac{\text{NorthSouth}}{\text{NorthSouth} + \text{EastWest}}$$

$$\text{EastWest} = 120 \times \frac{\text{EastWest}}{\text{NorthSouth} + \text{EastWest}}$$

図 1 5 提案アルゴリズム (AA) に基づく信号の切り替え時間調節

図のように、交差点に北から侵入する車両は、南、東、北に行く可能性があるため、各混雑指標を計算し、それらを加算したものを North の指標とする。同様に、South、East、West を計算し、南北方面の総合混雑指標 (NorthSouth) は、North + South、東西方面の総合混雑指標 (EastWest) は、East + West とし、その混雑指標に応じて、信号の切り替え時間を変化させる。このようにして、AA による信号適応制御を行い、そのシミュレーション結果を図 1 6 に示す。図から明らかなように、車両到着遅延時間推移は、SPA と AA のちょうど中間となり、このことから、信号の適応制御も有用であることが明らかになった。信号の切り替え時間の推移の一例として、交差点番号 606 と 1171 の推移を図 1 7 に示す。

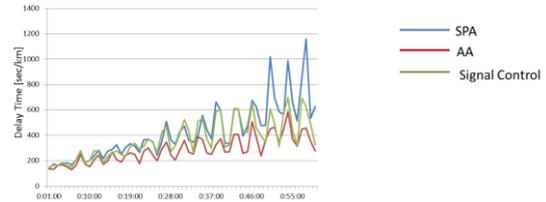


図 1 6 車両到着遅延時間推移。AA (赤) は提案アルゴリズム、SPA (青) は SPF アルゴリズム、Signal Control (緑) は、信号適応制御を表す。

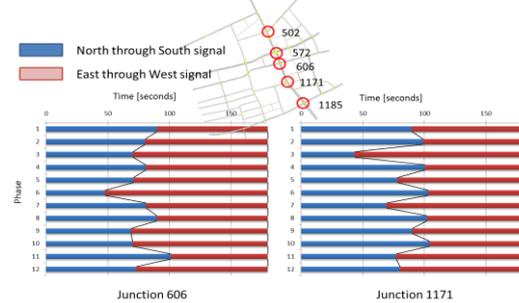


図 1 7 交差点 606 および 1171 の信号切り替え時間の推移

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- “Bio-Inspired Adaptive Control Algorithm for Traffic Congestion”, Proc. of 5th International ICST Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information, and Computing Systems, Paper No. 10670 (CD-ROM 10 pages) (2010), Akiyuki Iwasaki, Masahiro Okamoto.

- ”Fault Tolerant Mechanism of Bio-inspired Adaptive Routing System”, Proc. of 3rd Intl. Conf. on Bio-Inspired Models of Network, Information, and Computing Systems (BIONETICS 2008), CD-ROM 6 pages, (2008), Akiyuki Iwasaki, Tadasuke Nozoe, Takashi Kawauchi, Masahiro Okamoto, [学会発表] (計 1 件)

- ”Design an Effective Method of Bio-inspired Adaptive Routing Algorithm”, BIOINFO 2009: CBI-KSBSB Joint Conference, 2009.11.4-6, Busan, Korea, Akiyuki Iwasaki, Masahiro Okamoto.

[その他]

Home Page: <http://www.brs.kyushu-u.ac.jp/~okahon/bibliography.pdf>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本正宏 (OKAMOTO MASAHIRO)

九州大学・大学院農学研究院・主幹教授

研究者番号：40211122