

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月21日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656310

研究課題名（和文） 安定ゲーム概念に基づく自律分散型の交通システム制御法

研究課題名（英文） Stable Game Approach to Distributed Control of Transportation Systems

研究代表者

赤松 隆 (TAKASHI AKAMATSU)

東北大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：90262964

研究成果の概要（和文）：

本研究は、バスや鉄道システムに典型的に見られる運行不安定性（団子運転による運行遅延の増幅現象）を解消する自律分散的な制御スキームを提案する。提案スキームでは、各プレイヤー（列車、バス）は、局所的なリアル・タイム観測情報に基づく単純なルールに従って自律分散的に行動する。対象交通システムにおいて実現したい運行状態と「安定ゲーム」の均衡状態を対応付けることによって、提案制御スキームの安定性が保証されることを証明し、さらに、確率的な環境条件におけるスキームの頑健性を数値実験によって検証した。

研究成果の概要（英文）：

This study proposes a game theoretic approach to designing real-time vehicle operation strategies that prevent vehicle bunching and delay propagation in railway/bus systems. We formulate dynamical systems of vehicle (train/bus) motion that includes two types of delay propagation models: one is a passenger boarding model at each station, and the other is a car-following model in each section between stations. We then introduce some distributed control schemes to maintain scheduled operation. By mapping the control scheme to a stable game framework, it is proved that the dynamical system under the proposed scheme is asymptotically stable at some equilibrium states

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,700,000 円	810,000 円	3,510,000 円

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木計画学・交通工学

キーワード：交通計画，交通工学，自律分散制御，安定性，ゲーム理論

## 1. 研究開始当初の背景

高頻度運行のバスや LRT システムは、一定時隔の運行ダイヤが計画されていても、しばしば、“団子運転”状態に陥る。このような現象が発生する理由は、古くは寺田寅彦(1947)でも述べられている様に、遅れの

“positive feedback” が働くからである：1台の車両が何らかの原因で遅れると駅での車両到着時隔が長くなる；その結果、駅で待つ乗客が増加し、乗降時間がさらに遅れを増幅する；一方、定時走行の後続車両は駅で追いつき、団子状態となってしまう。

団子運転に類する現象は、バスや LRT の

みならず、高頻度運行の鉄道システムでも発生しうる。実際、首都圏の鉄道では、運行ダイヤの大きな乱れが頻発しており、多大な経済損失が生じている。さらに、仮屋崎ら(2010)によれば、通勤時間帯には、駅での遅れのみならず、駅間の走行区間における列車の“渋滞”現象とそれによる大幅な遅れも発生している。

このような公共交通システムの運行不安定性は、その遍在性と社会的重要性にも関わらず、一般性のある対処法(系統的な理論)が十分に確立していない問題である。実際、バス・鉄道における不安定性問題を統一的に扱える理論的な枠組は存在しない。また、従来研究(※)で交通機関別に提案されてきた理論も、現実的な状況下での有効性には多くの課題が残る。

#### ※ 従来研究に関する補足説明

バス・システムでは、様々な方策が検討されてきたが、現実的な状況下でも有効な一般性のある理論体系が確立しているとは言いがたい。従来の代表的方策は、Osuna-Newell (1972), Newell (1974, 1977) に始まる“holding strategy”である。'90年代までのこの系統の研究は、システム状態に関するリアル・タイム情報は未知との前提で、多くの理想化仮定に基づく解析的公式を求めるものであった。その様なアプローチの限界の認識とICT/ITSの発展・普及を背景として、2000年以降、リアル・タイム情報を活用した方法が提案されている(e.g. Hickman (2001), Eberlein et al.(2001))。しかし、単一地点での holding 方策しか扱えない／理想的な確定論的状況のみしか考察されていない／頑健性の系統的な保証が無いヒューリスティクスである等、多くの課題が残る。

鉄道システムでは、運行不安定性を解消するための制御理論を提示している研究は(申請者の知る限り)皆無である。実際、従来研究は、1) 列車運行に関する制約を考慮したダイヤ・パターンの最適化、2) 列車遅れの伝播分析、3) シミュレーション・モデルによるアドホックな各種分析; といった“*planning*”レベルの問題のみを対象としており、“*real-time control*”の理論的研究は、皆無である(より詳しくは、例えば、Huisman et al. (2005) によるレビューを参照)。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、バスや鉄道システムに典型的に見られる運行不安定性(e.g., 団子運転による運行遅延の増幅現象)を解消する「自律分散型制御」の設計法を示すことである。その方法の理論的基盤となるアイディアは、

制御問題で実現したい状態(e.g., 定時隔運行状態)と「安定ゲーム」(stable game)の均衡状態を対応付けることである。

安定ゲームとは、Monderer and Shapley (1996)のポテンシャル・ゲームをより一般化した概念であり、利得関数に変分不等式理論における単調性を満足するゲームである。この安定ゲームとして表現できる問題では、ゲームの利得関数から自然に定義される進化ダイナミクス(e.g. projection dynamic, smoothed best response dynamic)が、必ず均衡点に収束する。ここで、このダイナミクスは、各プレイヤー*i*(e.g. 個別車両)が、各時点*t*で観測されるシステム状態*x(t)*に適応して選ぶ行動*A<sub>i</sub>(x(t))*の集計の結果を意味している。つまり、安定ゲームの均衡点は、各プレイヤーが自律分散的にリアル・タイム観測情報に基づく単純なルールに従って行動することを繰り返すだけで、任意の状態から到達できる安定的な状態である。

この提案理論を用いれば、システムの構成要素(e.g., バス車両, 鉄道列車, 道路信号機)に課すべき「行動ルール」を系統的に設計できる。そして、その設定されたルールに基づいて各要素が自律分散・適応的に行動した集積の状態が、実現したいシステム状態に安定的に収束する。本研究では、このアプローチをバス・鉄道の運行安定化問題、および、道路交通における自律分散型の信号制御問題に適用し、その制御法の頑健性を系統的に検証する。

## 3. 研究の方法

本研究では、具体的な制御法を開発する対象として、先述の(1)バスと(2)鉄道システムの運行安定化問題に加え、(3)道路交通ネットワークにおける自律分散型の信号制御問題を考える。

何れの問題においても、対象システムの状態方程式の詳細は異なっても、制御法設計の基本的方法は共通である。そこで、本研究では、理論構築の手続きを2段階に分解する。まず、第一フェイズでは、構造が明快な確定論的状況を前提とした理論を構築する。続く第二フェイズで、その方法論を確率論的な状況に拡張し、各システムで得られる制御法の系統的な頑健性を検証する。

## 4. 研究成果

(1) 平成23年度は、確定論的な状況に対する鉄道・バス列車運行安定化問題と道路信号制御問題の各々に対して、プロトタイプ・モデルと理論を構築した。より具体的には、

① 制御なし状態での対象システムのモデル構築(状態方程式の定式化)、

② 対象システム・モデルで実現したい状態を均衡解とするゲーム条件の設計,  
③ 均衡解の(局所的)安定性条件を満たすプレイヤー(鉄道・バス車両/信号機等のシステム構成要素)の行動ルール(自律分散型制御法)の導出,  
を行った。また、運行安定化問題に対して、数値実験により、提案制御スキームの頑健性を検証した。

(2) 平成 24 年度は、平成 23 年度に開発した確定論的なプロトタイプ・モデルに確率論的な枠組を導入し、さらに路線条件等の前提条件をより一般化した理論を構築した。より具体的には、まず、バス・鉄道システム問題に対して、

① 状態方程式に確率的ショック項を追加したモデルの定式化,

② 確率論的な状態変化に対応した制御安定性条件の導入,

③ 複数路線での相互作用を考慮した最適制御問題の定式化;

を行った。そして、その問題に対する安定性条件および最適制御ルールの特徴を明らかにした。また、道路ネットワークにおける通行権取引を用いた交通需要管理問題に対して、前年度までに開発された理論を確率論的な枠組に一般化した。より具体的には、利用者集合が日々変動する確率論的な状況下においても、観測情報に基づく自律分散・適応的な通行権配分スキームによって、効率的な交通流配分状態を頑健に実現できることが示された。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

(1) Kentaro Wada and Takashi Akamatsu, A Hybrid Implementation Mechanism of Tradable Network Permits System which Obviates Path Enumeration, Joint publication for Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Symposium on Transportation and Traffic Theory, and Transportation Research Part E, 査読有, 2013 (accepted).

(2) 和田健太郎, 赤松 隆, 吉 相俊, 大澤 実, 高密度鉄道ダイヤにおける列車集群化を抑制する運行制御方策, 土木学会論文集 D3, 査読有, Vol.68, No.5, pp.1025-1034, 2012.

(3) Kentaro Wada, Takashi Akamatsu and Minoru Osawa, A Control Strategy to Prevent Propagating Delays in High-Frequency Railway Systems,

査読有, Proceedings of the First European Symposium on Quantitative Methods in Transportation Systems (CD-ROM), 2012

(4) Kentaro Wada and Takashi Akamatsu, Distributed Signal Control based on Tradable Network Permits: Design and Evolutionary Implementation, 査読有, Proceedings of the 4th International Symposium on Dynamic Traffic Assignment (CD-ROM), 2012.

(5) 大澤 実, 赤松 隆, “列車の渋滞”を抑制するための制御方策と運ダイヤの同時決定, 土木計画学研究・講演集, 査読無, Vol.46, 248 (CD-ROM), 2012.

(6) 和田健太郎, 赤松 隆, ボトルネック通行権取引制度に基づくエリア流入制御, 土木計画学研究・講演集, 査読無, Vol.46, 233 (CD-ROM), 2012.

(7) 原 祐輔, 赤松 隆, ネットワーク GEV 型経路選択モデルを用いた確率的利用者均衡配分, 土木計画学研究・講演集, 査読無, Vol.46, 060 (CD-ROM), 2012.

(8) 和田健太郎, 赤松 隆, ネットワーク通行権取引市場のオークションメカニズム, 土木学会論文集 D3, 査読有, Vol.67, No.5, pp. 376 - 389, 2011.  
DOI: 10.2208/jscejipm.67.376

(9) 和田健太郎, 赤松 隆, ネットワーク通行権取引制度を活用した自律分散的な信号制御:定常状態モデル, 土木計画学研究・講演集, 査読無, Vol.44, 116 (CD-ROM), 2011.

(10) 吉 相俊, 赤松 隆, 和田健太郎, 高密度鉄道ダイヤにおける列車集群化を抑制する運行制御方策, 土木計画学研究・講演集, 査読無, Vol.43, 320 (CD-ROM), 2011.

[学会発表] (計 11 件)

(1) Kentaro Wada and Takashi Akamatsu, A Hybrid Implementation Mechanism of Tradable Network Permits System which Obviates Path Enumeration, ISTTT20 (the 20<sup>th</sup> International Symposium on Transportation and Traffic Theory), 2013 年 7 月 18 日, Delft University of Technology (Netherlands).

(2) Kentaro Wada, Takashi Akamatsu and Minoru Osawa, A Control Strategy to Prevent Propagating Delays in High-Frequency Railway Systems, the First European Symposium on Quantitative

Methods in Transportation Systems, 2012 年 9 月 5 日, École polytechnique fédérale de Lausanne (Switzerland).

(3) Kentaro Wada and Takashi Akamatsu, Distributed Signal Control based on Tradable Network Permits: Design and Evolutionary Implementation, DTA2012 (the 4th International Symposium on Dynamic Traffic Assignment), 2012 年 6 月 4 日, Martha's Vineyard, Massachusetts (USA).

(4) 大澤 実, 赤松 隆, “列車の渋滞” を抑制するための制御方策と運ダイヤの同時決定, 第 46 回土木計画学研究発表会, 2012 年 11 月 4 日, 埼玉大学.

(5) 和田健太郎, 赤松 隆, ボトルネック通行権取引制度に基づくエリア流入制御, 第 46 回土木計画学研究発表会, 2012 年 11 月 4 日, 埼玉大学.

(6) 原 祐輔, 赤松 隆, ネットワーク GEV 型経路選択モデルを用いた確率的利用者均衡配分, 第 46 回土木計画学研究発表会, 2012 年 11 月 3 日, 埼玉大学.

(7) 和田健太郎, 赤松 隆, ネットワーク通行権取引制度を活用した自律分散的な信号制御:定常状態モデル, 第 44 回土木計画学研究発表会, 2011 年 11 月 26 日, 岐阜大学.

(8) 吉 相俊, 赤松 隆, 和田健太郎, 高密度鉄道ダイヤにおける列車集群化を抑制する運行制御方策, 第 43 回土木計画学研究発表会, 2011 年 5 月 29 日, 筑波大学.

(9) 赤松 隆, 交通渋滞を解消する新たなメカニズムの設計 (特別セッション「制度設計への工学的アプローチ」招待講演), 日本経済学会2011年度春季大会. 2011年5月22日, 熊本学園大学.

(10) 和田健太郎, 赤松 隆, ネットワーク通行権取引市場のオークションメカニズム, 日本経済学会 2011年度春季大会, 2011年5月21日, 熊本学園大学.

(11) Kentaro Wada and Takashi Akamatsu, An Auction Mechanism for Implementing Tradable Network Permit Markets: An Intelligent Transportation System for Eliminating Traffic Congestion on Road Networks, The 6th Pan Pacific Conference on Game Theory, 2011 年 4 月 28 日, 東京工業大学.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

赤松 隆 (TAKASHI AKAMATSU)  
東北大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号: 90262964

### (2) 研究分担者

なし