

機関番号：12608

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760324

研究課題名(和文) 2次元振動子の結合による適応的振動子ネットワークの設計問題とその工学的応用

研究課題名(英文) Development of Interconnection of 2-Dimensional Adaptive Oscillators and its Applications to Engineering Systems

研究代表者

早川 朋久 (HAYAKAWA TOMOHISA)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：30432008

研究成果の概要(和文)：

本応募研究では、制御器としての振動子ネットワークにおける個々の振動子を区分的アファインシステムとして低次元化することによって、パターン制御機構を本質を保存した低次元フィードバック系として表し、周期的・振動的システムが環境変化に対して安定(適応)的に周期運動を維持するメカニズムと制御手法の構築した。また、個々の振動子が分岐現象を起こす可能性のある場合、振動子ネットワーク全体において個々の分岐現象がどのような影響を及ぼしていくのか考察した。

研究成果の概要(英文)：

In this proposed research, a method for analysis and synthesis of networked low-dimensional nonlinear oscillators that are synchronized on the plane is developed. Specifically, in the network of piecewise affine dynamics, bifurcation properties by changing system dynamics are investigated for nonlinear periodic orbits. It turns out that Hopf bifurcation and saddle-node bifurcation occurs by changing the affine terms of the subsystems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：同期制御, アファインシステム, ネットワーク制御

## 1. 研究開始当初の背景

(1) ヒューマノイドロボットや多脚移動ロボットの不整地歩行の実現には、路面変化等の環境変化に対して適応性を持つ制御系の設計が不可欠である。既存研究の多くは、生物や人間に見られる現象を構成論的に模倣することにより、適応的な機能の人工的な

実現を目指すアプローチである。

(2) 一方、生物が有するPGによる適応機能は、システム制御理論の観点から見た際には、個々の振動子における周期軌道安定性や振動子間のネットワーク構造(結合関係)を変えることによる位相同期安定性の2種類

として捉えられ、そうした安定性を創成する基本原理を解明することは体系的なパターン生成制御系の設計論を構築する上で不可欠である。

(3) しかしながら、CPG (PGの結合系) を構成する従来の各振動子は、非線形ダイナミクスから創られるリミットサイクルとして生成され、その非線形ダイナミクスの状態の次元は一般に高く設定されている。このような複雑度を有するままで基本原理を追求することは現実的に難しく、本質のみを保存した解析のし易い新しいハイブリッド的数理モデルに基づくアプローチを構築することが重要であると考えられる。

## 2. 研究の目的

(1) 以上のような観点に基づき、本応募研究では、解析し易い低次元振動子ネットワークを提案し、それをを用いた制御系を構成することで、システム制御理論の観点から、環境変化の下で安定なパターン運動を維持するための適応メカニズムの基本原理を解明し、低次元振動子ネットワーク制御系設計のための指針を与えることを目的とする。

(2) また、この振動子ネットワークによる制御系を、周期性を有する工学・社会システムに適用し、制御系設計の有効性を確認する。

## 3. 研究の方法

(1) まず、安定周期軌道の2次元区分的アファインシステムによる生成の検討と、環境変化を含むダイナミクスの周期軌道安定条件の導出を行った。

(2) 上記(1)にもとづき、低次元区分的アファイン周期軌道のネットワークドシステムの解析と低次元区分的アファイン振動子制御系と歩行システムなど工学システム・社会システムの制御論的統合化を行う手順をとった。最後に、数値実験による設計論の検証と低次元振動子ネットワークによる周期的システムへの適用原理の総括をした。

## 4. 研究成果

(1) 従来、歩行制御では高次元ダイナミクスの帰結として生成されてきた位相空間内の振動子の周期軌道を、2次元位相平面を区分的に分割しそれぞれにアファインダイナミクスを割り当てることにより構成する手法を確立することができた。

① 構成する周期軌道は安定なリミットサイクルである必要があるため、区分的アファイン

システムが安定な周期軌道を持つための位相空間の分割条件を導出し、それぞれの領域にアファインダイナミクスを割り当てる指針を与えた (図1)。

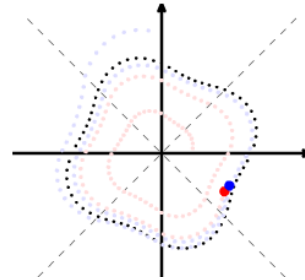


図1 安定なリミットサイクルと、それに両側から収束していく軌道

② 所望の周期軌道の特性が与えられているときに、その周期軌道を2次元区分的アファインシステムとして近似的に生成するための条件を導いた。このとき、周期軌道そのものを近似する手法と同時に、その安定周期軌道への収束方向・収束速度などの特徴づけも併せて行った。

(2) 上記(1)で構成した2次元振動子が安定で唯一の周期軌道をもつ条件と、区分的アファインダイナミクスの係数が変化したときに、その唯一周期軌道が分岐現象を起こし複数の安定・不安定な周期軌道に分かれていく過程を解析した。このようなHopf分岐やFlip分岐などの周期軌道の分岐現象の解析により、2次元アファイン振動子を複数結合したときに、その振動子ネットワークが生成するであろうパターン制御系全体の振る舞い (同期パターンの遷移) を予測できるようになった (図2)。

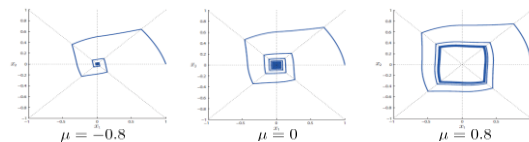


図2 区分的アファインシステムがHopf分岐を起こす様子

(3) さらに、上記(1)で構成した区分的アファイン振動子を結合させ、ネットワーク全体の同期特性を、振動子間の相互結合の強さとアファインシステムのシステムパラメータの観点から解明した。また、個々の振動子が分岐現象を起こす可能性のある場合、振動子ネットワーク全体において個々の分岐現象がどのような影響を及ぼしていくのか解析した (図3)。この一連の解析は、環境変化に対するネットワークの強度・結合構造の適応的变化の体系化への端緒となった。

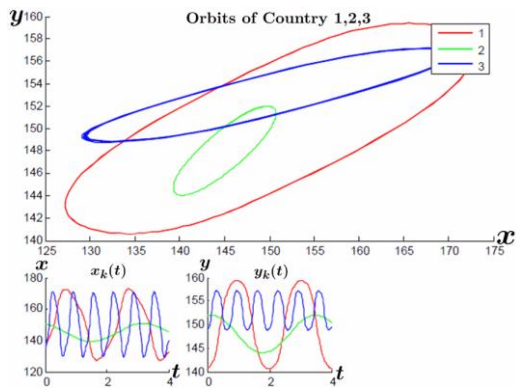


図3 3つの異なる振動子からなるネットワークシステムの周期軌道

(4) 上で確立した理論を都市部での交通信号網などの周期的変化を必要とするシステムに対し応用し、低次元振動子ネットワーク制御系を提案した。また、振動子ネットワーク制御系に駆動された工学・社会システム全体を2次元振動子系とプラントの状態方程式との階層的フィードバックインターコネクションとして捉え、パターン生成制御系によって環境変化に対して適応的に維持される条件をある限られた仮定の下に定式化した。

#### 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4件)

- ① T. Ishikawa and T. Hayakawa, "On equivalence of critical probabilities of dynamic gossip protocol," SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 掲載決定. (査読有)
- ② T. Hayakawa, H. Ishii, and K. Tsumura, "Adaptive quantized control for nonlinear uncertain systems," Systems and Control Letters, vol. 58, no. 9, pp. 625-632, 2009. (査読有)
- ③ S. Hara, T. Hayakawa, and H. Sugata, "LTI systems with generalized frequency variables: A unified framework for homogeneous multi-agent dynamical systems," SICE J. Contr. Meas. Sys. Integr., vol. 2, no. 5, pp. 299-306, 2009. (査読有)
- ④ D. Hobson-Garcia and T. Hayakawa, "Using congestion graphs to analyze the stability of network congestion

control," Int. J. Intel. Contr. Syst., vol. 14, no. 2, pp. 125-133, 2009. (査読有)

[学会発表] (計14件)

- ① T. Ishikawa and T. Hayakawa, "Gossip protocol on the ad hoc networks and its approximated saturation," in Proc. IEEE Conf. Dec. Contr., (Atlanta, GA), pp. 2638-2643, December 16, 2010.
- ② M. Siami, H. Ishii, K. Tsumura, and T. Hayakawa, "Adaptive quantized control for linear uncertain discrete-time systems over channels subject to packet loss," in Proc. IEEE Conf. Dec. Contr., (Atlanta, GA), pp. 4655-4660, December 16, 2010.
- ③ A. Cetinkaya, K. Kashima, and T. Hayakawa, "Stability and stabilization of switching stochastic differential equations subject to probabilistic state jumps," in Proc. IEEE Conf. Dec. Contr., (Atlanta, GA), pp. 2378-2383, December 15, 2010.
- ④ M. Terada, T. Hayakawa, and K. Aihara, "A new variable time-gap policy for circular highways," in Proc. Int. IEEE Conf. Intel. Transp. Syst., (Madeira Island, Portugal), pp. 1730-1734, September 22, 2010.
- ⑤ K. Furusawa and T. Hayakawa, "Impulsive transfer of elliptical orbits for consensus of two spacecraft with conservation of system areal velocity," in Proc. Math. Theory Netw. Syst., (Budapest, Hungary), pp. 1743-1748, July 8, 2010.
- ⑥ H. Ishii, K. Tsumura, and T. Hayakawa, "Coarseness in quantization for stabilization of linear systems over networks," in Proc. Math. Theory Netw. Syst., (Budapest, Hungary), pp. 1211-1218, July 6, 2010.
- ⑦ S. Nishiyama and T. Hayakawa, "Stability analysis for interconnected piecewise linear planar systems," in Proc. Amer. Contr. Conf., (Baltimore, MD), pp. 4827-4832, July 2, 2010.

- ⑧ T. D. Le, K. Furusawa, and T. Hayakawa, ``Orbital formation control of multiple spacecraft,’’ in Proc. Amer. Contr. Conf., (Baltimore, MD), pp. 3636–3641, July 1, 2010.
- ⑨ A. Cetinkaya, K. Kashima, and T. Hayakawa, ``Stability of stochastic systems with probabilistic mode switchings and state jumps,’’ in Proc. Amer. Contr. Conf., (Baltimore, MD), pp. 4046–4051, July 1, 2010.
- ⑩ W. M. Haddad, T. Hayakawa, and T. Yucelen, ``Adaptive reduced-order dynamic compensation for nonlinear uncertain dynamical systems,’’ in Proc. Amer. Contr. Conf., (Baltimore, MD), pp. 1689–1694, June 30, 2010.
- ⑪ M. Hutagalung and T. Hayakawa, ``Partial asymptotic stabilization of the synchronization of two underactuated spacecraft,’’ in Proc. IEEE Conf. Dec. Contr., (Shanghai, China), pp. 1776–1781, December 16, 2009.
- ⑫ T. Hayakawa, ``Adaptive synchronization control of spacecraft with fixed rotational axis,’’ in Proc. ICCAS–SICE Int. Joint Conf., (Fukuoka, Japan), pp. 4092–4096, August 21, 2009.
- ⑬ S. Nishiyama and T. Hayakawa, ``Stability analysis for 2-dimensional switched linear systems,’’ in Proc. Amer. Contr. Conf., (St. Louis, MO), pp. 1771–1777, June 10, 2009.
- ⑭ D. Hobson-Garcia and T. Hayakawa, ``Using congestion graphs to analyze the stability of network congestion control,’’ in Proc. IEEE Int. Conf. Networking Sensing Contr., (Okayama, Japan), pp. 559–564, March 28, 2009.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

早川 朋久 (HAYAKAWA TOMOHISA)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号： 30432008