

## 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 4月24日現在

機関番号：17501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21656108

研究課題名（和文）光合成ダイナミクスの複数平衡点埋め込みによる変調制御に関する研究

研究課題名（英文）Research on modulated control by embedding equilibrium point in null-cline of photosynthesis dynamics

研究代表者

末光治雄（SUEMITSU HARUO）

大分大学・工学部・助教

研究者番号：50162839

研究成果の概要（和文）：本研究では、擬リアプノフ関数を用いて、フィードバック制御による複数平衡点埋め込みにより、ヘテロクリニック軌道やリミットサイクルを発生させることにより、非線形系のリズムパターンの変調制御を行うことを目的としている。特に、非線形系への実例に適用可能であることを示すために、ホップ分岐を起こす CAM 型光合成 (crassulacean acid metabolism, ベンケイソウ型有機酸代謝) と呼ばれる乾燥環境に高度に適応した炭素代謝機構に適用し、数値シミュレーションにより、光合成制御としての変調制御手法の有効性を検証した。まず、定常解であるヌルクラインを入力変数の静的フィードバック系の形で設計することにより、複数平衡点をダイナミクスの中に埋め込む手法を提案した。ヌルクラインを用いた統一的な理論解析法を導出するまでには、至らなかったが、数値解により、リミットサイクルの振幅、周期、位相の調節が可能であるかどうかを検証した。その結果、外部二酸化炭素濃度を入力とする場合には振幅の調整に、また、光の強さを入力とする場合には、位相と周波数の調整に向いていることを確認した。さらに、このような制御性能には限界が存在し、その限界がホップ分岐を引き起こす点になっていることを明らかにした。さらに、非線形系の動特性の減衰・成長率を測る非線形フローと微分フローを入力データとする瞬時リアプノフ関数を提案し、光合成リズムに適用し、微分フローを用いた瞬時リアプノフ関数平衡点周りの減衰・成長率になっている一方、非線形フローを用いた瞬時リアプノフ関数は、任意に指定した点に対する減衰・成長率になっていることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Biological rhythm is characterized by free-running, endogenous rhythms, ranging from periods of seconds (e.g. heart beat) to years (e.g. population dynamics). They can adjust themselves in a certain entrainment range to varying external influences, which thereby gives them greater plasticity for adaptation to changes in the environment than a rigid coupling could accomplish. Blasius et al. (2005) investigated the mechanism of endogenous circadian photosynthesis oscillations of plants performing crassulacean acid metabolism (CAM) in terms of a nonlinear theoretical model. They used throughout continuous time differential equations which modes adequately reflect the CAM dynamics. By incorporating results from both a complementary and a continuous membrane model, a detailed description of the molecular malate transport in and out of the vacuole through the tonoplast membrane was achieved. Their analysis showed that the membrane effectively acts as a hysteresis switch regulating the oscillations. It thus provided a molecular basis for the circadian clock. The model showed regular endogenous limit cycle oscillations that were stable for a wide range of temperatures, in a manner that complies well with experimental data. In this research, the nonlinear dynamical model of CAM is discussed from the control theoretical viewpoint. The state-variables of the nonlinear dynamic equations are an internal  $\text{CO}_2$  concentration, a malate concentration in the cytoplasm, a malate concentration in the vacuole, and an order of the tonoplast membrane. The input variables are an external  $\text{CO}_2$  concentration, a

light intensity and a temperature. The output is assumed to be a part of the state variables. We can define the following problems in the control theoretical points of view. We presented a dynamic estimator of the tonoplast order and a fuzzy identifier of the nonlinear function in the dynamics of the tonoplast order. Next, we analyzed the CAM dynamics as a slow/fast system and the P-type feedback controller with the adaptive observer. Moreover, we proposed two types of the feedback controllers with a constant gain. The feedback controllers allow us to reshape the nullcline of the fast system of the CAM dynamics. The simulation results were given to examine the performance of the proposed dynamic estimator and controller using MATLAB/Simulink. Finally, we proposed an instantaneous decay/growth rate that is a kind of generalized Lyapunov exponent and call the instantaneous Lyapunov exponent with respect to a decay function. The instantaneous Lyapunov exponent is one of the measures that estimate the decay and growth rates of flows of nonlinear systems by assigning a comparison function and can apply a stable system whose decay rate is slower than an exponential function.

#### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	0	1,300,000
2010年度	800,000	0	800,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	240,000	3,140,000

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：CAM型光合成，非線形フィードバック制御，リミットサイクル，分岐

#### 1. 研究開始当初の背景

欧米ではシステムバイオロジーが流行になってきている。制御系研究者もこのシステムバイオロジーに注目が集まりつつあるが、全般的に、人間の脳機能や運動機能に関心が限定されているようであり、植物の生体リズムに対するシステム論的取扱はあまり見られない。植物学者は生命活動の本質を実験を通じて明らかにすることに全力を注いでいる。生命の本質を探ることが第一と考えられるが、我々制御工学者としては、それらの研究の補助的立場として、生命活動状態を推定・制御するという面からシステムティックに取り扱う方法、つまり、データの入出力関係から計算機を用いて、内部状態を推定したり、制御したりする方法を提案するものである。特に、制御理論の面から言うと、近年非線形系解析の強力なツールとなっている受動システムと植物における生体リズムの関係をつける意味がある。また、植物細胞間の同期は局所的である反面、外部入力に対してロバストであるという実験結果を制御システムのロバスト性解析から明らかにできる可能性がある。

#### 2. 研究の目的

本研究では、擬リアプノフ関数を用いて、フィードバック制御による複数平衡点埋め込みにより、ヘテロクリニック軌道やリミットサイクルを発生させることにより、非線形系のリズムパターンの変調制御を行うことを目的としている。さらに、非線形系への実例に適用可能であることを示すために、温度をパラメータとして、ホップ分岐を起こすCAM型光合成 (crassulacean acid metabolism, ベンケイソウ型有機酸代謝) と呼ばれる乾燥環境に高度に適応した炭素代謝機構に適用し、数値シミュレーションにより、光合成制御としての変調制御手法の有効性を検証する。

#### 3. 研究の方法

まず、研究の基礎確立のために、制御変数に対する分岐特性の解析を行った。制御変数である外部二酸化炭素濃度、気温、外光の強さを変化させたときの分岐特性を解析した。特に、平衡点の安定性について詳細に調べた。また、液胞膜の非線形関数の温度特性をボルツマンの輸送方程式から計算

することにより、温度をパラメータとしたホップ分岐を解析した。さらに、外部二酸化炭素濃度と外光の強さをパラメータとして場合の分岐分類を行った。ついで、ヌルクラインと制御変数との関係を導出した。4変数の微分方程式系であるため、速いモード(2次元)と遅いモード(2次元)に分割して、ヌルクラインを計算した。最後に、さらに、研究の仕上げとして、複数平衡点埋め込みを行う非線形状態フィードバック則を導出した。とくに、3つの外部入力それぞれに対して、複数の平衡点を埋め込み、周波数制御および位相制御を実現する制御則を導出した。また、これらの結果を、国内誌解説論文、国際会議論文、国内会議にて公表した。

#### 4. 研究成果

本研究では、CAM 生体リズムのダイナミクスにおいて、内部二酸化炭素量、細胞質のリンゴ酸が速い応答をするため、これを slow manifold と呼ばれる代数方程式で近似することにより、2次ダイナミクスを持つ slow system を構成した。さらに、この slow system を用いて、液胞膜並びに非線形関数を推定する1次元の適応オブザーバの構成し、その安定性を証明した。提案したオブザーバでは、入手可能な状態量は、内部二酸化炭素量および液胞内のリンゴ酸とすることができ、細胞質のリンゴ酸は slow manifold を用いて、内部二酸化炭素量から近似値を求めることができることを示した。ついで、設計したオブザーバの性能を MATLAB/Simlink を用いて検証した。擬リアプノフ関数を用いて、フィードバック制御による複数平衡点埋め込みにより、ヘテロクリニック軌道やリミットサイクルを発生させることにより、非線形系のリズムパターンの変調制御を行う制御則を実現した。特に、非線形系への事例に適用可能であることを示すために、ホップ分岐を起こす CAM 型光合成 (crassulacean acid metabolism, ベンケイソウ型有機酸代謝) と呼ばれる乾燥環境に高度に適応した炭素代謝機構に適用し、数値シミュレーションにより、光合成制御としての変調制御手法の有効性を検証した。まず、定常解であるヌルクラインを入力変数の静的フィードバック系の形で設計することにより、複数平衡点をダイナミクスの中に埋め込む手法を提案した。ヌルクラインを用いた統一的な理論解析法を導出するまでには、至らなかったが、数値解により、リミットサイクルの振幅、周期、位相の調節が可能であるかどうかを検証した。その結果、外部二酸化炭素濃度を入力とする場合には振幅の調整に、また、光の強さを入力とする場合には、位相と周波数の調整に向いていることを確認した。さらに、このような制御性能には限界が存在し、その限界がホ

ップ分岐を引き起こす点になっていることを明らかにした。また、非線形系の動特性の減衰・成長率を測る非線形フローと微分フローを入力データとする瞬時リアプノフ関数を提案し、光合成リズムに適用し、微分フローを用いた瞬時リアプノフ関数平衡点周りの減衰・成長率になっている一方、非線形フローを用いた瞬時リアプノフ関数は、任意に指定した点に対する減衰・成長率になっていることを明らかにした。

#### 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7件)

- ① Yusuke Totoki and Takami Matsuo : Decay/Growth Rate Estimation Using Instantaneous Lyapunov Exponent, Int. J. Bifurcation and Chaos, 22-3, (2012) 1250047 (13 pages) DOI: 10.1142/S0218127412500472
- ② Nobumichi Nagano and Takami Matsuo: Edge Detection and Feature Extraction of Gastrointestinal Radiographs Using Adaptive Differential Filter and Level Set Method, Int. J. of Advanced Mechatronic Systems, 3-4, pp.279-287 (2011).
- ③ Tasuya Nomura, Takahiko Irie, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo: Stochastic Security Testing for Chaotic Communication Systems against Error Function Attack, IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering, 6-5, 450-456 (2011).
- ④ Yusuke Totoki, Takami Matsuo, Meihong Zheng, and Osamu Hoshino : Local intracortical circuitry not only for feature binding but also for rapid neuronal responses, Cognitive Processing, 11, 347-357 (2010).
- ⑤ 松尾孝美, 十時優介, 末光治雄: 適応オブザーバによる CAM 植物光合成リズムの内部状態推定, 計測と制御, 49-7, 451-456 (2010).
- ⑥ Yusuke Totoki, Kouichi Mitsunaga, Haruo Suemitsu and Takami Matsuo : Firing Pattern Estimation and Synchronization Detection of Synaptically Coupled Hindmarsh-Rose Neurons, Neural Network World, 19-5, 483-497 (2009).
- ⑦ Kouichi Mitsunaga and Takami Matsuo: Adaptive Estimation of Friction Forces with Differential Filter, Int. J. Systems Science, 40-12,

## 〔学会発表〕 (計 17 件)

- ① Akira Goto, Yusuke Totoki, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo : Adaptive Observer-Based Controller for Biological Clock in Crassulacean Acid Metabolism, Proceedings of 2011 8th Asian Control Conference (ASCC), Kaohsiung, Taiwan, 500-505 (2011).
  - ② Akira Goto, Yusuke Totoki, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo : Control of Biological Clock in Crassulacean Acid Metabolism Using Nullcline Design, Proc. of IEEE/SICE-SII2011, 1084-1089 (2011).
  - ③ Teppei Hiroshige, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo : Stochastic Evaluation of Dissipative Observer for Multivalued Nonlinear System with Coulomb Friction, Proc. of IEEE/SICE-SII2011, 392-397 (2011).
  - ④ Jun Mukae, Yusuke Totoki, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo : Parameter and Input Estimation in Hindmarsh-Rose Neuron by Adaptive Observer, Proc. of IEEE/SICE-SII2011, 1091-1095 (2011).
  - ⑤ Junichi Yokoyama, Kohtaro Mihara, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo : Swing-Up Control of an Inverted Pendulum by Two Step Control Strategy, Proc. of IEEE/SICE-SII2011, 1061-1066 (2011).
  - ⑥ 十時 優介, 向江 潤, 末光 治雄, 松尾 孝美: HR ニューロンモデルの内部パラメータおよび外部入力信号の推定, 第 2 回プラントモデリングシンポジウム, 15-18 (2011).
  - ⑦ Yusuke Totoki, Akira Goto, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo : Synchronization Detection of Biological CAM Plants Using Instantaneous Lyapunov Exponent, proc. of SICE Annual Conference 2010, 514-519 (2010).
  - ⑧ Ryuta Ito, Yusuke Totoki, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo : Adaptive Estimation of Firing Patterns of Hindmarsh-Rose Neurons and Synchronization Detection with Instantaneous Lyapunov Exponents, proc. of SICE Annual Conference 2010, 1743-1748 (2010).
  - ⑨ Nobumichi Nagano, Takami Matsuo : Computer-Aided Diagnosis of Gastrointestinal Radiographs Using Adaptive Differential Filter and Level Set Method, proc. of Int Conf. on Modelling, Identification and Control, pp. 441-446 (2010).
  - ⑩ Yuta Kitsuka, Tsuyoshi Nimiya, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo : Non-Model-Based Velocity and Acceleration Estimators for a Suspension System with Parallel Connection of a Hydraulic Actuator, proc. of 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, pp. 549-554 (2010).
  - ⑪ 十時 優介, 末光 治雄, 松尾 孝美 : Hindmarsh-Rose ニューロンの発火パターンの適応推定と瞬時リアプノフ指数を用いた同期判定, 第 54 回システム制御情報学会研究発表講演会 F31-3 (2010).
  - ⑫ 後藤 彬, 十時 優介, 末光 治雄, 松尾 孝美 : Critical Manifold を用いた CAM 植物の非線形ダイナミクス推定, 第 53 回自動制御連合講演会, 587-592 (2010).
  - ⑬ Yusuke Totoki, Ryuta Ito, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo : Simultaneous Parameter and Input Estimation of Hindmarsh-Rose Neuron by Adaptive Observer, Proc. of ICCAS-SICE 2009, 4896-4901 (2009).
  - ⑭ Yusuke Totoki, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo : Decay Rate Estimation of Continuous Time Series Using Instantaneous Lyapunov Exponent, Proc. of ICCAS-SICE 2009, 5073-5077 (2009).
  - ⑮ Ryuta Ito, Yusuke Totoki, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo : Adaptive Input Estimation of a Hodgkin-Huxley Neuron, Proc. of ICCAS-SICE 2009, 5230-5235 (2009).
  - ⑯ 松尾 孝美, 十時 優介, 末光 治雄 : Hindmarsh-Rose ニューロンの同期判定と適応同定, 第 9 回 SICE 制御部門大会 (2009).
  - ⑰ 伊東 隆太, 十時 優介, 末光 治雄, 松尾 孝美 : Hodgkin-Huxley ニューロンモデルにおける入力電流の適応推定, 第 28 回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 202B2 (2009).
- 〔図書〕 (計 1 件)
- ① Takami Matsuo, Yusuke Totoki, Haruo Sumitsu : Robustness and Security of  $H_\infty$ -Synchronizer in Chaotic Communication Systems, "Challenges and Paradigms in Applied Robust Control Book edited by Andrzej Bartoszewicz", Intech, ISBN 978 - 953

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://matlab0.hwe.oita-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

末光 治雄(SUEMITSU HARUO)  
大分大学・工学部・助教  
研究者番号：50162839

### (2) 研究分担者

松尾 孝美(MATSUO TAKAMI)  
大分大学・工学部・教授  
研究者番号：90181700

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：