

科学研究費補助金研究成果報告書

平成24年 5月18日現在

機関番号：24506 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21760331
 研究課題名（和文） 確率共振現象を取り入れた制御システムに関する研究

研究課題名（英文） Control systems utilizing stochastic resonance phenomena

研究代表者

堀田 育志 (HOTTA YASUSHI)
 兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：30418652

研究成果の概要（和文）：本研究は、生体システムがノイズを巧みに利用している原理である確率共振(SR)現象を人工の制御システムに取り入れ、生体のようになやかで臨機応変な能力を生み出す制御方法の確立とアナログ電子回路を用いた制御デバイスの創成を目的とした。SR現象を示すニューロン素子を用いてリング発振器（SRリング発振器）を作製し、それらを組み合わせることでSR現象を取り入れた制御システムを実現した。SR制御システムにおいて、システムに加えるノイズ強度が強い場合はより臨機応変な制御になるが、ノイズが弱い場合はその逆に挙動がダイナミックになった。このことから、SR現象は、制御システムにとって臨機応変性を高めるのに有効であることが分かった。また、FPGAに実装した並列化SR制御システムを用いた信号復元実験により、SR素子の並列化によって素子故障に対する頑強性が高まることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Aim of this study is to develop a novel concept of control systems utilizing stochastic resonance (SR) phenomena, which may be used in a wide variety of biological systems, in order to possess artificial control systems to take on adaptable and robust ability. I fabricated ring oscillators of neuron-like elements with the SR phenomenon (SR element) in electronic circuit, and achieved the SR control system to assemble the oscillators. This control system shows unusual features. At suitable amplitude of noise is added to the system, the system shows adaptable behavior against some kind of system error. Furthermore, a study by using an FPGA device indicates that the parallelization approach of the SR elements provides the system robustness against element failures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接	
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：制御システム

1. 研究開始当初の背景

これまで、コンピュータの演算処理速度が向上すれば生物が行っているようなしなやかで臨機応変な制御を人工的に模倣できると考えられてきたが、高速なコンピュータが開発されるにつれ、アルゴリズム的な演算を正確かつ高速に行うというコンピュータの基本原理が生体システムの動作原理とは全く異なっていることが明らかになってきた。そのため、コンピュータにはない生体由来の原理を応用して真に生体らしい制御を実現することが求められていた。

生体の神経システムは、確率共振 (Stochastic Resonance:SR) とよばれるノイズを有効に利用する原理を備えており、神経システムの信号 (約 100mV) に対して十分影響を及ぼす大きさの環境ノイズ (約 25mV) のもとでシステムを安定に動作させている。そこで、本研究では、臨機応変な制御システムを実現するため、SR 現象とノイズによって生じる確率的な信号をうまく利用する仕組みとが必要になると考え、SR を制御システムに取り入れることを提案した。

2. 研究の目的

SR 現象を示す閾値型の素子である SR 型ニューロン素子を組み合わせてリング発振器 (SR リング発振器) を作製し、このリング発振器を用いることで SR 現象を取り入れた制御システム (SR 制御システム) の実現を目指した。研究の目的は、以下の (1) ~ (4) の項目とした。

(1) SR リング発振器は、センシング機構を持たないため、発振パターンは常に一定であった。そこで、SR リング発振器にセンシング機構を導入し、発振器の発振パターンを環境情報に合わせて変調することを目指した。

(2) センシング変調が可能な SR リング発振器を用い、ノイズに対して頑強な制御を実現するシステムの開発を目指した。

(3) SR 制御システムを用いて実際のアクチュエータ制御を行うシステムの開発を行い、SR 現象がシステムの制御特性に与える影響を調べることを目的とした。

(4) 並列化 SR 制御システムを用いて、シ

ステム内に動作しない SR 素子 (故障箇所) が存在する場合のパフォーマンス変化について調べ、SR 現象が制御システムの頑強性に与える影響の調査を目的とした。

3. 研究の方法

本申請研究では、アナログ電子回路によって SR 素子、リング発振器、各種制御システムを実現した。また、Field-Programmable Gate Array (FPGA) を用いることで、より短時間かつ SR 素子を高密度に集積したシステムを実現し、研究の効率を向上させた。

研究目的に沿って、以下の (1) ~ (4) の内容について研究を行った。

(1) SR リング発振器では、リング内の伝達信号の強度を変化させることで発振の周波数を変調できる。そこで、SR リング発振器に光センサの出力を取りつけ、リング内の伝達信号の強度をセンサからの信号入力によって変調できる機構を検討した。

(2) 光センシング変調が可能な 2 つの SR リング発振器をアナログ電子回路で作製し、それぞれの発振器出力の和とるように接続する。ここでセンサに入力を加えることで SR リング発振器の発振周波数を変調し、和の出力がどのように変化するかを調べた。

(3) SR 制御システムを用いて 4 自由度の二次元移動の台車ロボットの光源追尾制御に応用し、SR 現象がシステムの制御特性に与える影響を調べた。

(4) FPGA を用いて並列化 SR 制御システムを実際のハードウェアとして実現し、動的に素子の並列数を変化させたときのシステムの応答を比較した。この素子の並列数の変化は、素子の故障数に対応している。

4. 研究成果

(1) 図 1 は、SR リング発振器の模式図を示している。各丸印は、アナログ電子回路によって作製された SR 素子である。それぞれの SR 素子の出力はリング状に結合されており、リング内を循環する再帰信号が適度な強度のノイズ印加によって SR 現象で伝達される。

よってこの発振器では、外部から各 SR 素子に供給しているノイズを止めると、発振が止まる。

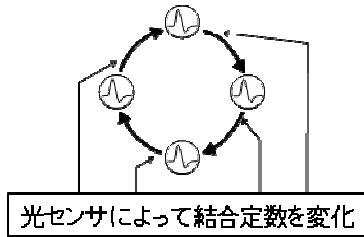


図 1 : SR リング発振器。丸の部分が SR 素子を表し、それらのリング結合で構成される。

続いて、図 2 に発振器の発振周波数とノイズ強度の関係の結合定数依存性を示している。ここで素子間の結合定数は、前段素子の出力信号強度と次段素子の閾値の比によって与えられる。結合定数が一定の場合は、ノイズ強度の増加と共に周波数が線形的に高くなる。一方、ノイズ一定の条件下で結合定数を小さくすると、周波数が高くなる。つまり、素子間の結合定数を動的に変化させることで SR 発振器の発振周波数を制御することができることが分かった。

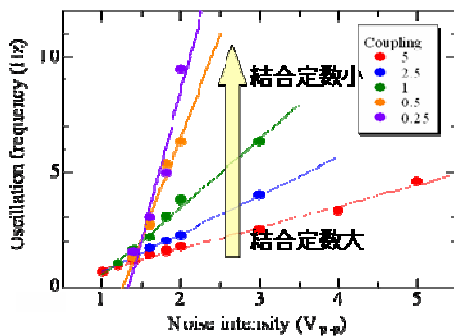


図 2 : SR リング発振器の発振周波数-ノイズ強度特性の結合定数依存性。SR 素子間の結合定数が小さいほど、発振周波数が高い。

そこで、図 3 のように SR 素子間に光センサを取りつける、光の強度で結合定数を変化させることができる SR リング発振器を作製した。この発振器では、センサに光が照射されると直列抵抗の値が減少することによって出力が大きくなり、その結果、結合定数が大きくなる仕組みである。この仕組みによって光による発振周波数の変調が可能になった。

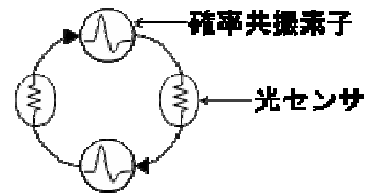


図 3 : 光センサを導入した SR リング発振器

(2) SR リング発振器の発振周波数は、一定の値ではなく、周期的にゆらいているが、時間平均すると分散をもちながら一定値に収束する。そこで、発振器の光センサに外部から入力を加えることで発振周波数を変調し、時間平均値をずらすことによって制御量を発生させ、システムの制御を行う。図 4 は、この制御を説明するタイミングチャートの模式図を示している。

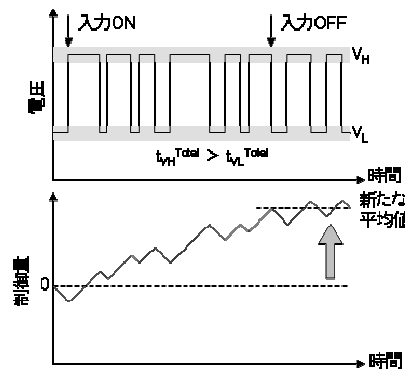


図 4 : SR リング発振器を用いた制御システムのタイミングチャート。入力を ON にすることで時間平均値がシフトし、入力が OFF になるまでの間に矢印の分だけの制御量を生む。

図 4 において入力が ON になる前では、制御量の時間平均変化は 0 であるが、入力が ON になると V_H 状態もしくは V_L 状態の一方のトータル時間が長く（もしくは短く）なり、 $t_{VH}^{Total} = t_{VL}^{Total}$ の関係が破られる。例えば、入力によって V_H 状態のトータル時間が長くなった場合は、図のように $t_{VH}^{Total} > t_{VL}^{Total}$ の関係になり制御量は増加し、平均値が 0 より大きくなる。入力がなくなると再び $t_{VH}^{Total} = t_{VL}^{Total}$ の関係に戻り、新たな平均値でシステムの状態を保持する。ここで制御量を様々な物理量に対応させることにより、対象物を制御することができる。例えば、制御量をアクチュエータの前後動作の移動量に対応づけると、制御量が増加すると前進し、減少すると後退するといった運動制御を行うことができる。

(3) 4 自由度の二次元移動の台車ロボットを作製し、SR リング発振器を用いた制御システムを用いてロボットの光源追尾制御を行った。図 5 は、制御システムのブロック図を示している。4 つの SR リング発振器を用い、それらの 2 つずつを組み合わせ一つのモーターを制御する方法をとった。

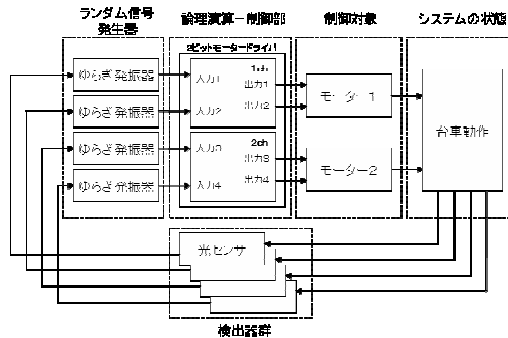


図 5 : 台車ロボット制御のブロック図

また、実際に作製された台車ロボットを図 6 に示す。この台車制御のノイズ強度依存性を調べることで SR 現象がシステムの制御特性に与える影響を調べた。その結果、システムに加えるノイズ強度を変化すると挙動が大きく変化し、ノイズ強度が強い場合は動作がより小刻みになり臨機応変な制御になる一方、制御にかかる時間は増加し、ノイズが小さいと場合はその逆の挙動になった。この結果から、SR 現象は、制御システムにとって臨機応変性を高めるのに有効であることが分かった。

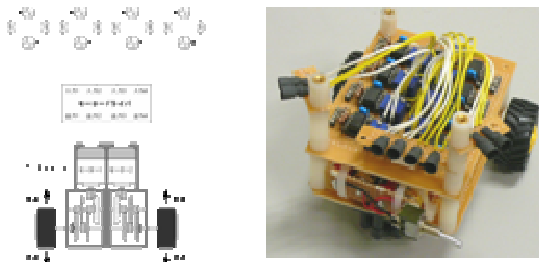


図 6 : 実際に作製された台車ロボット

(4) SR 制御の頑強性を確認するため、FPGA を用いて SR ユニットとノイズジェネレータを 96 個並べた並列化 SR 制御システム (Collins モデル) を作製した。図 7 にシステムのブロック図を示す。

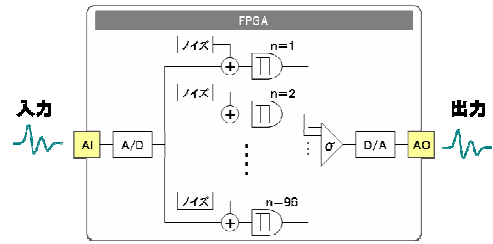


図 7 : 並列化 SR 制御システムのブロック図

このシステムにリファレンスの入力信号 (正弦波) を入力し、並列 SR 素子の数 (故障素子数の数) を変化させながら出力信号を測定し、入力信号がどれだけ再現されているかを調べた。このとき、入出力信号の相関係数を求めることで、信号の再現性を評価した。

図 8 は、相関係数とノイズ強度の関係の並列素子数依存性を示している。並列化 SR ユニット数が少ないときは、曲線は釣り鐘型になり、信号の入出力相関はあるノイズ強度で最大となる典型的な SR 現象が確認できる。一方、ユニット数が 96 個の場合は、あるノイズ強度以上で入出力相関係数がほぼ一定となる Without tuning の効果が見られた。一方、素子の故障率 50% に対応するユニット数が 50 個の場合でも、96 個のときとほぼ同じ相関係数を維持していることがわかる。これは、並列数が 100 個程度あるシステムでは、素子の 50% に故障が生じてもシステムのパフォーマンスが低下しないことを意味している。この結果、SR 素子を並列化して制御システムを構成することで、故障に対して頑強なシステムが実現できることが分かった。

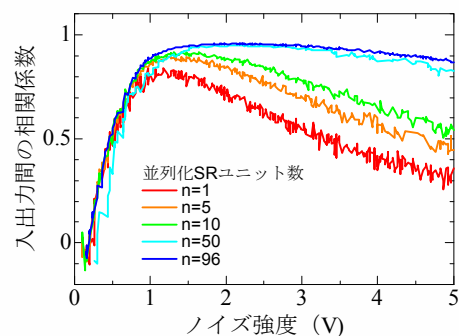


図 8 : 並列化 SR 制御システムの入出力相関係数とノイズ強度の関係の並列ユニット数依存性

(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2件)

T. Kanki, Y. Hotta, N. Asakawa, T. Kawai, and H. Tanaka, "Noise-driven signal transmission using nonlinearity of VO₂ thin films", *Appl. Phys. Lett.* **96**, 242108-1 - 242108-3 (2010).

堀田育志, "LabVIEW & LabVIEW FPGA モジュール入門", 映像メディア学会誌 65, 161-165 (2011)

[学会発表] (計5件)

堀田育志

「並列化確率共振ユニットを用いたリアルタイム信号検出・解析システムの開発」

【招待講演】LabVIEW 研究成果発表会、2009年12月11日、WTCコンファレンスセンター

堀田育志、神吉輝夫、浅川直紀、川合知二

「確率共振ユニットを用いたリアルタイム音声信号検出」

第57回応用物理学関係連合講演会、2010年3月17日～20日、東海大学 湘南キャンパス

T. Kanki, Y. Hotta, N. Asakawa, T. Kawai, H. Tanaka

"Direct observation of metallic path formation in stochastic resonance devices using VO₂"

17th international workshop on oxide electronics, Sep. 19 - 22, 2010, Hyogo, Japan

T. Kanki, Y. Hotta, N. Asakawa, T. Kawai, and H. Tanaka

"Noise-driven signal transmission using nonlinear property of VO₂ thin films"

2010 MRS fall meeting, Nov. 29 - Dec. 3, 2010, Boston, USA

神吉輝夫、堀田育志、浅川直紀、川合知二、田中秀和

「酸化バナジウム薄膜の非線形電気応答を利用した確率共鳴素子のマルチチャンネル特性評価」

第58回応用物理学関係連合講演会、2011年3月26日、神奈川工科大学

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

名称：制御信号発生方法、その装置、及び移動体駆動制御装置

発明者：堀田育志、神吉輝夫、浅川直紀、川合知二

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：PCT/JP2009/063771

出願年月日：2009年8月4日

国内外の別：国外

名称：コンパレータ、ノイズジェネレータ、確率共振素子

発明者：神吉輝夫、堀田育志、浅川直紀、川合知二、田中秀和

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：PCT/JP2009/067261

出願年月日：2010年10月2日

国内外の別：国外

○取得状況 (計1件)

名称：「ゆらぎ発振器、ゆらぎ発振システム、観測装置、及び制御システム」

発明者：堀田育志、神吉輝夫、浅川直紀、河原敏男、川合知二、田畑仁

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：特許 2009-529056

取得年月日：2010年11月25日

国内外の別：国外

[その他]

受賞名

アプリケーションコンテスト 2009【一般部門】最優秀賞

受賞者：堀田育志

受賞内容：「並列化確率共振ユニットを用いたリアルタイム信号検出・解析システムの開発」

授与団体：日本ナショナルインスツルメンツ株式会社

詳細 URL :

<http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-12408>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀田 育志 (HOTTA YASUSHI)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30418652

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：