

令和 6 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11867

研究課題名（和文）脳型無線センサネットワークにおけるリザバ計算による詳細かつ高精度な情報取得の研究

研究課題名（英文）Acquisition of detailed and accurate information from a brain-morphic wireless sensor network by reservoir computing

研究代表者

若宮 直紀（Wakamiya, Naoki）

大阪大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：50283742

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：センシング、信号処理、通信の全てをパルス信号によって実施する低消費電力でメンテナンスフリーな「脳型無線センサネットワーク」の確立のため、リザバ計算の応用によってパルス信号授受のダイナミクスから領域に関する詳細な情報を高い精度で取得するためのシステム設計に取り組んだ。デバイス構成や入力電流、読み出しアルゴリズムを適切に選択し、組み合わせることにより、温度分布推定においては閾値を一つしか持たないバイナリセンサを用いて連続値の空間分布を高精度で推定できた。また、アクチュエータによるイベント検知では、アクチュエータが領域中央に位置する場合にイベント検知率82.81%を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

デバイスの構造や情報処理ならびに通信のアルゴリズムが極めてシンプルであるため低コスト、低消費電力でありながらも干渉や故障に対して非常にロバストな無線センサネットワークを容易に構築できることから、特に多数または高密度な環境でのセンシング情報収集を行う多様なアプリケーションの基盤技術として広く応用、展開が可能である。あわせて物理リザバ計算に関する研究の観点でも新たな知見を得ており当該分野の今後の発展に寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：To establish a new architecture called "brain-morphic wireless sensor network" which is highly energy-efficient and highly robust by performing all of sensing, information processing, and communication in the form of pulses, we investigated the optimal design of input, communication, and output. By an appropriate combination of device configuration, input current, and a regression algorithm, the accurate estimation of spatial distribution of temperature was accomplished. Regarding event detection by an actuator, the probability of event detection was as high as 82.81% when an actuator was located at the center of the region.

研究分野：バイオ情報通信工学

キーワード：無線センサネットワーク リザバ計算 温度分布推定 イベント検知

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

無線センサネットワークは安全、安心かつ持続発展可能な社会の基盤技術として期待されているが、デバイスコスト、電力コスト、メンテナンスコストの低減は未だ重要な課題である。そこで研究代表者はセンシング、信号処理ならびに通信の全てをパルス信号によって表現、処理、伝送する低消費電力でメンテナンスフリーな全く新しいアーキテクチャ「脳型無線センサネットワーク」を提唱している。脳における情報処理のモデルの一種であるリザバ計算のアルゴリズムを応用することで、ランダムに散布された100台のデバイスのうち5台のパルス発信状態を観測するだけでイベントの発生箇所を92%~99%の確率で正しく検出できているが、広く応用されるためにはイベントの有無にとどまらないより詳細な情報を取得できなければならない。

2. 研究の目的

本研究では、センシング、情報処理、通信の全てをパルス信号で実施する脳型無線センサネットワークによる情報基盤の確立を目指し、リザバ計算の応用によってパルス信号授受のダイナミクスから観測値の空間分布などの詳細な情報を高い精度で取得することを目的とする。

3. 研究の方法

センシング、情報処理、通信の全てをパルス信号で実施する脳型無線センサネットワークにおいて、温度分布推定とアクチュエータによるイベント検出を対象として、観測対象の状態に応じた多様なダイナミクスを形成するようデバイスとネットワークを設計することにより、推定精度の向上を図る。そのため、センサ観測値に応じて多様なパルス発信を行うようにデバイスを設計し(課題1)、それらの相互作用によって全体として多様なダイナミクスを形成するようにネットワークを設計する(課題2)とともに、ダイナミクスから高次元の情報を抽出するための読み出しアルゴリズムを構築する(課題3)。

4. 研究成果

脳型無線センサネットワークにおいては全ての情報はパルス信号によって表現、処理、伝送される。デバイスはバイナリセンサとニューロンモデルを実現する信号回路ならびにパルス送受信器を備えている。デバイスはニューロンモデルにおける膜電位のダイナミクスにもとづいてパルス信号を発信する。バイナリセンサは観測値が閾値を超えたときに信号回路に電流を印加することでパルス信号の高頻度な発信を促す。パルス信号はブロードキャストされ、電波の到達範囲に位置する他のデバイスはパルス信号を受信するとニューロンモデルにもとづいて膜電位を変化させる。脳型無線センサネットワークはリカレント構造を持つスパイクングニューラルネットワークであるリザバとみなすことができ、入力、すなわちセンサの観測状態がパルス信号授受として表現される非線形なリザバ内部状態のダイナミクスに反映される。読み出しユニットがネットワークの一部のノード(読み出しノードと呼ぶ)のパルス信号発信を観測、変換することによって情報を取り出す。以下に脳型無線センサネットワークの概念図を示す。

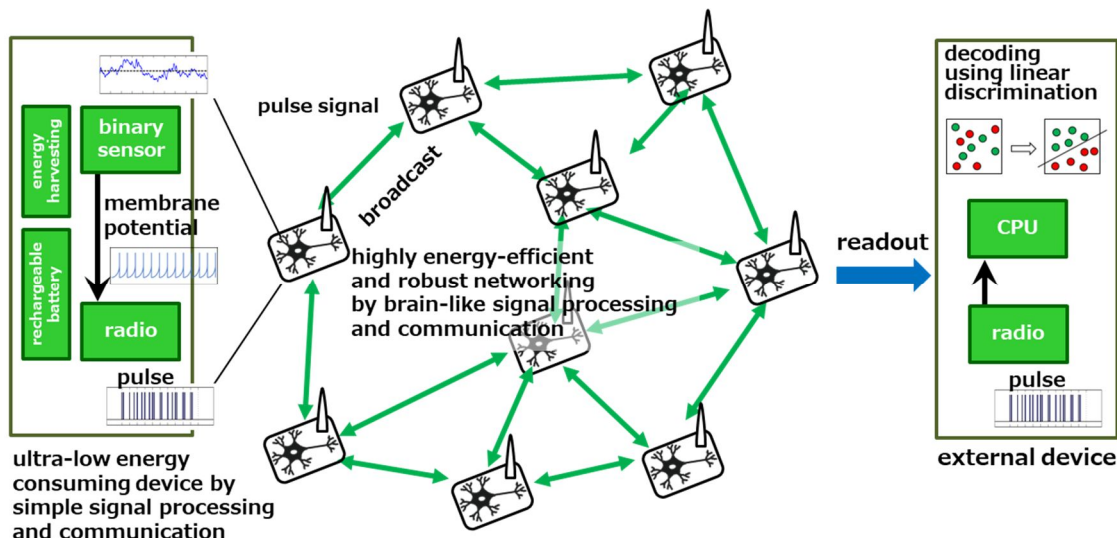


図1: 脳型無線センサネットワーク
デバイス、ネットワーク、読み出しユニットあるいはアクチュエータは、それぞれリザバ計算に

おける入力層、中間層（リザバ）、出力層に対応する。本研究ではまず物理リザバ計算の制約の下で各層で実施可能な設計の選択肢を挙げ、それらの組み合わせについて評価を行った。

課題1：多様なパルス発信を行うためのデバイス設計

入力層については、以下の三つを検討した。

- ・入力電流の大きさ：ニューロンモデルにおける膜電位のダイナミクスには周囲のデバイスから受信したパルス信号による電流とバイナリセンサからの電流が入力される。前者に比して後者が大きすぎる場合にはデバイスのパルス送信はセンサからの入力電流が支配的になる。特に読み出しノードでセンサからの電流入力が生じると、その背後にあるデバイス、つまりネットワークの発火ダイナミクスが隠れてしまう。一方で後者が小さすぎると発火ダイナミクスにセンサ情報が現われない。また、センサ閾値に応じて電流の大きさを変えることも有効であると考えられる。

- ・読み出しノードのセンサ有無：読み出しノードのパルス発信状態がネットワークのダイナミクスをより良く反映するためには読み出しノードにセンサを搭載しなければ良い。一方で、読み出しノードが配置された箇所の情報が取得できない問題が生じる。

- ・抑制性ノードのセンサ有無：抑制性ノードにおいてセンサからの電流入力が生じると周囲のデバイスのパルス発信を抑制するためネットワークのダイナミクス生成を阻害する可能性がある。

課題2：多様なダイナミクスを形成するためのネットワーク設計

中間層については、ノードがアプリケーション要求に応じて配置されること、また、デバイスが識別子を持たないことなどから、トポロジ制御は困難である。そこで以下の一点について検討した。

- ・抑制性ノードの割合：抑制性ノードを少なくするとネットワーク全体としてのパルス発信が活発になるが発火量には上限があるためかえってダイナミクスのバリエーションが減少してしまう。一方で抑制性ノードが多すぎるとネットワーク全体の発火活動が低下する。

課題3：情報抽出アルゴリズムの構築

出力層については、以下の二つを検討した。

- ・読み出しアルゴリズム：リザバ計算における読み出しアルゴリズムは簡単な線形回帰で十分であると言われているが、温度分布推定では離散的なパルス発信状態から連続的な温度を推定する必要があるため、非線形な回帰も検討に加えた。具体的には、線形回帰、リッジ回帰、ラッソ回帰、サポートベクタ回帰、アダプスト回帰、ランダムフォレスト回帰、および勾配ブースティング回帰について検討した。

- ・読み出し遅延：入力層からの入力が入力層ダイナミクスに反映されるためには時間がかかる。そこで読み出しユニットはある時刻における入力（センサ観測値）を一定時間後から推定する。

上記の選択肢の様々な組み合わせについてシミュレーション評価を行った。例えば下図の左は読み出し遅延が、また、右は読み出しアルゴリズムが、それぞれ温度分布推定における平均二乗誤差に与える影響を評価した結果である。左図よりセンサ入力ネットワーク全体の発火ダイナミクスとして現われるためにはおよそ20~40秒かかることが分かる。また、右図よりランダムフォレスト回帰が最も推定誤差が小さく安定的に温度推定を行えることが分かる。

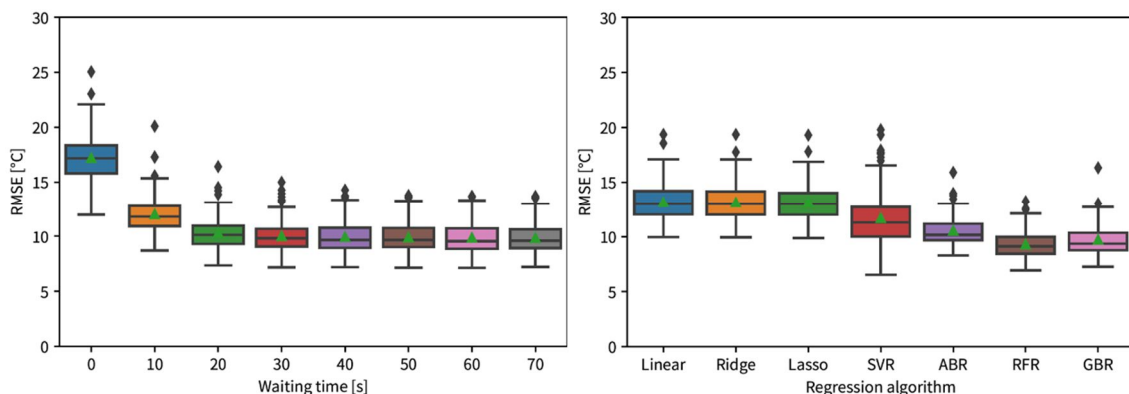


図2：読み出し遅延と推定誤差（左）、読み出しアルゴリズムと推定誤差（右）

標準設定として、ノード数 100、興奮性ノード 80%、抑制性ノード 20%、センサ入力電流 10000mV、読み出しノード配置を領域の四隅と中央、読み出しアルゴリズムをランダムフォレスト回帰とし、様々な検討を行った。その結果、温度分布推定においては、センサ閾値に応じて入力電流の大きさを 1000 ~ 10000mV の範囲で設定し、抑制性ノードの割合を 20% に保ちつつデバイス数 125 台にすることで興奮性ノード数 100 を確保するとともに、抑制性ノードにセンサを付与しない

ことで最も推定精度が高くなった。訓練における推定誤差は、熱源 1~4 に対してそれぞれ 1.02 度、4.09 度、5.38 度、4.82 度であり、テストにおける推定誤差はそれぞれ 6.74 度、7.90 度、10.16 度、11.25 度であった。下図は左が熱源が一つの場合の実際の温度分布、右が推定結果である。領域は 10x10 のセルに分割されており、各セルに示す値はその温度である。各セルにはランダムに設定された単一の閾値を持つバイナリな温度センサを具備したデバイスが配置されている。すなわち、各セルについて、配置されたセンサの閾値を超えたか否かでは無く、例えば 24 度の閾値を持つセンサが配置されたセルの温度が 93 度であることが推定できている。

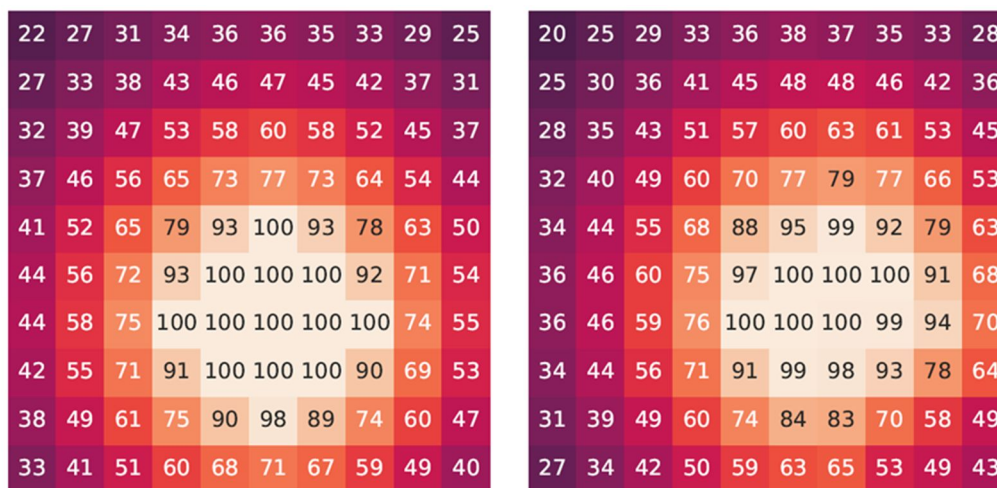


図 3：実際の温度分布（左）、推定結果（右）

アクチュエータによるイベント検知においては、読み出しユニットに相当するアクチュエータが自身の周囲にあるデバイスのパルス発信状態しか観測できず、かつ、それらデバイスの近接性により発火状態が似通うことが、イベント検知を困難にしている。そこでセンサを備えず通信距離が長いリレーノードを追加配置することで精度向上を図った。その結果、イベント検知率として、アクチュエータが領域中央に位置する場合に 82.81%、最も厳しい条件であるアクチュエータが領域隅に位置する場合には 20.72%を達成した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Soraki Hirano and Naoki Wakamiya	4. 巻 E15-N
2. 論文標題 Brain-morphic wireless sensor network and its application to temperature distribution estimation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 3件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Naoki Hirata and Naoki Wakamiya
2. 発表標題 Investigation of Metrics for Readout-Independent Evaluation of the Functional Robustness of Liquid State Machines
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoki Wakamiya
2. 発表標題 B-WSN: brain-morphic wireless sensor network and physical reservoir computing
3. 学会等名 International Conference on Multimedia Information Technology and Applications（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoki Wakamiya
2. 発表標題 Neural computing in wireless IoT network
3. 学会等名 World Symposium on Communication Engineering（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平野空暉, 若宮直紀
2. 発表標題 脳型無線センサネットワークによる温度分布推定の性能評価
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 若宮直紀
2. 発表標題 IoTネットワークにおけるニューロコンピューティング
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

脳の情報処理機構に学ぶネットワーク https://www-waka.ist.osaka-u.ac.jp/index.php/research/research-2

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------