

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12107

研究課題名(和文)空間フリーな脳型配線・メモリ中心計算に向けた新規機能素子の開拓

研究課題名(英文)Development of new neurofunctional devices for memcomputing by using free-space wiring polymer.

研究代表者

赤井 恵 (AKAI-KASAYA, Megumi)

大阪大学・工学研究科 ・助教

研究者番号：50437373

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は空間を自由に配線できる可塑性を持った有機ポリマー材料を用い、物理的にも柔らかいニューラルネットワークを基礎とした情報回路の作成を目指した。ポリマー配線の成長様式は空間フリーなニューロン成長とネットワーク形成を、成長制御による抵抗値の変化と保持によってメモリ機能を実現する。

本研究期間に、研究当初は実現していなかった電極間ワイヤ成長中の電極間抵抗を正確に計測できるようになった。またワイヤの成長様式を変化させることで抵抗変化を当初の一桁から3桁以上へと大幅な改善を達成した。これらの結果、基本論理回路であるAND,OR,NOR,NAND回路を、ポリマー成長させながら形成することに成功した。

研究成果の概要(英文)：We tried to create an informational circuit based on neural network consists of an organic polymer with plasticity which grows freely in a space filled by an electrolytic solution. The polymer growth forms the neural networks and changeable and holdable conductance of the wire realizes the memory function in the network.

In the research period, in situ measurement of wire conductance during the wire growth has become possible by making an especial electronic circuit design. By elaborating the growth condition of the wire, conductance change width was greatly improved from the original one digit to more than three orders of magnitude. As a result, we succeeded in automatically forming AND, OR, NOR and NAND gate within few minutes.

研究分野：ナノテクノロジー

 キーワード：ニューラルネットワーク 人工知能 ニューラルコンピューティング ハードウェア ポリマーワイヤ
 - PEDOT:PSS

1. 研究開始当初の背景

我々の脳の中ではニューロンが成長し、学習しながら高度な情報回路を作り上げる。その成長を真似たニューラルネットワークアルゴリズムは画像認識や音声認識といったこれまでのコンピュータが出来なかった「あいまいな」情報認識に大きな成功を収めており、既に多方面において盛んに活用され始めている。また学術的な人工脳機能の再現へ向けた取り組みも数多くあり、ビッグプロジェクトであるThe Human Brain ProjectやBrain Initiative はアーキテクチャを得意とする欧州及び米国のトップグループである。しかながら彼らはCMOSのような既存の半導体デバイスを用いた研究が主流である。現状では脳が成長する様式を、物理的に何かを成長させ、一から模倣し構築しようとする取り組みは世界的にもほとんど例がない。

2. 研究の目的

本研究では実際にニューラルネットワーク様式の情報回路を、柔らかく、自己成長するポリマー材料を用いて作製する。溶液中ポリマー配線による原始論理回路を完成することが出来れば、それは即ち、その回路がより大規模アルゴリズムによっても成長しうることの証明である。脳と同じ可塑性を持った材料で、脳と同じような溶液中で情報回路を作りうるこの研究の成功は社会的にも大きな意味を持つ。ただ、本研究の延長上を見据えれば、目指す実用の脳型集積システムは決して本物の脳やコンピュータの代わりになるものではない。しかしその一部分の機能、例えば人間のあいまいな表情を読み取ったり、画像から本当に必要な情報のみを認識したりすることは出来ようになる。本研究の成功は、より脳に近い機能を持った実装可能なチップが、安価に、高速かつ低電力駆動、さらにフレキシブルかつコンパクトに作製することが可能な未来を約束する。

3. 研究の方法

本研究では、ニューロン間の軸索成長と、各接点において結合重みを変化させるシナプスの働きを、ポリマー配線に担わせる。任意の端子間をポリマーによって配線し、ニューラルネットワーク機械学習アルゴリズムを用いて結果をフィードバックし、各配線の抵抗値を変化させて回路を变形、つまり学習させる。最終的には3D配線を用いた多出力の情報分類回路が本手によって作製することが可能であることを実証する。

4. 研究成果

倒立型顕微鏡を用いた PEDOT:PSS ワイヤー成長の観察
 詳細な観察を行いながら条件を変更出来る為、複数本数の成長が可能であることを確

認した。(図1)

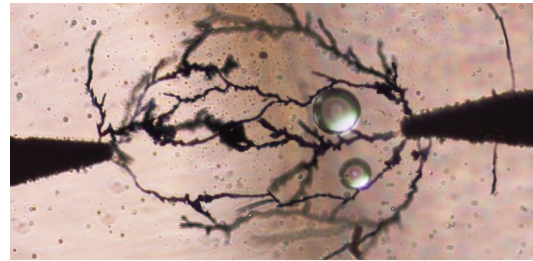


図1 複数本数成長したワイヤ

複数本数が成長可能であることによって、成長中のコンダクタンス変化量が大幅に増大した。すなわち、機械学習による回路の成長時に利用できるコンダクタンス変化幅が増える。研究申請当初は一本のワイヤが繋がるまでのコンダクタンス変化を学習に利用すると考えていた。複数本数が成長することで、回路の作製後溶液から出して乾燥したとしても回路が保たれると考えられる。これは現実の応用を目指していく上で大きなアドバンテージである。図2に乾燥後の複数ワイヤを示す。乾燥後の電極間コンダクタンスは3割ほど減少した。



図2 乾燥後の複数 PEDOT-PSS ワイヤ

次に多電極間の PEDOT-PSS ワイヤー成長を試みた。モノマー溶液は電解質である PSS が含まれるために高い電気伝導度を持ち、同一溶液内における多電極間では意図しない漏れ電流が意図するワイヤー成長を阻害する可能性がある。よって溶液内の端子間におけるワイヤー成長を確認した。図3は約 300 μ mギャップ電極が 400 μ mの距離に隣り合った4電極対におけるワイヤーの光学顕微鏡像である。(a)左から1番目3番目にそれぞれワイヤー成長信号を印加している。しかしながらなんの信号も印可していないはずの2番目の電極にも成長がはじまっており、ここでも電流の漏れがあることがわかる。隣同士が近い電極であるとその頻度も高い。(b)では上2,3の電極と下3の電極に斜め架橋しているが、このときの成長信号は三番目の電極対にしか印加していない。このように同一溶液内のマルチ電極間では意図しない電極間のワイヤー架橋が見られた。今後目指す回路の密度と、信号精度によってこれらの成長を制御する必要がある。例えば成長を目指す電極間には、片方をアースにするのではなく、両端に逆位相の電圧を印加する等の工

夫が必要と考えられる。

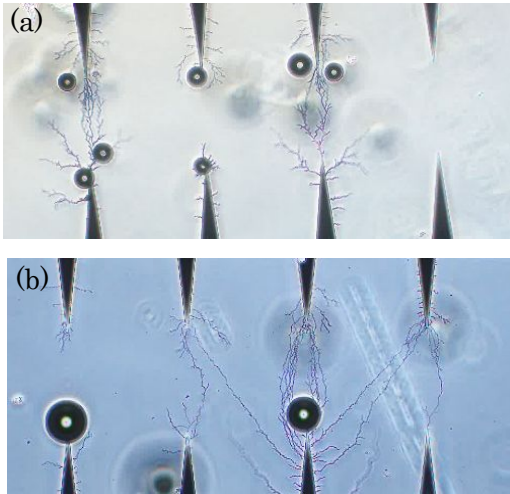


図3 同一溶液内4電極対におけるワイヤー成長の例

次に PEDOT-PSS ワイヤー成長中のコンダクタンス変化の計測に取り組んだ。図4 微小信号による成長中コンダクタンス計測回路を示す。ポリマーワイヤー学習中にはテストと選択的成長を繰り返す必要がある。テストに大切なことはポリマーを成長させずにコンダクタンスを計測することである。よって図4に示すようなテスト電圧印加電流計測回路（下側）とワイヤー成長回路（上側）に自動で切り替わる回路が必要となる。

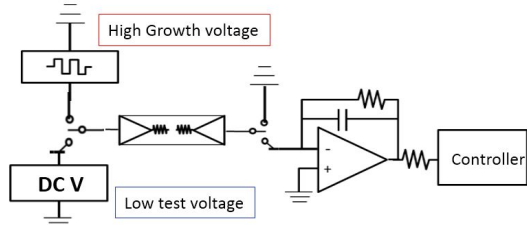


図4 ワイヤ成長とコンダクタンス計測自動切り替え回路

図5に0.1Vのテスト印可電圧で計測した電流値を示す。コンダクタンスの増加は最初の一本のワイヤーが接続するまでほぼゼロであるが、その後接続ワイヤー数

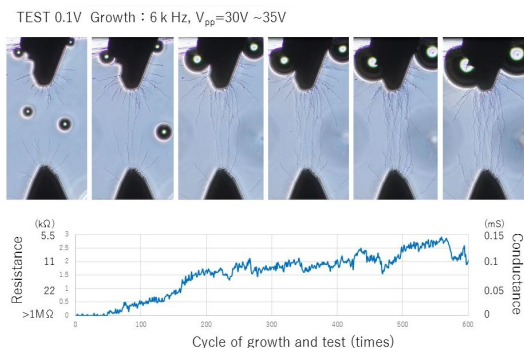
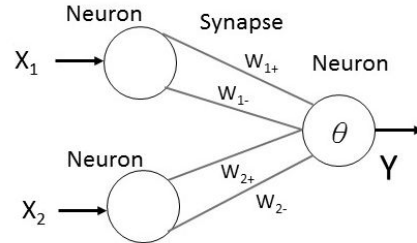


図5 ワイヤー成長時に計測した抵抗及びコンダクタンス変化

が増加する毎に増えていく。コンダクタンスの増加は滑らかなものではないものの、溶液に比べるとコンダクタンスが高いことから小さなテスト電圧でも計測が出来る、コンダクタンス変化値も大きい。

図4の回路を4枚組み合わせ、コンダクタンス値出力をマイコンに読み込むことによってANDゲート作製のシステムを構築した。



$$Y = \text{sgn} \sum (x_{ip} \omega_{ip} - x_{im} \omega_{im} - \theta)$$

$$\Delta W_i = \varepsilon (T - Y) X_i \quad \text{誤差関数}$$

標準デルタ関数 ε : 正の定数

図6 2入力1出力のネットワーク回路

図6にANDゲート作製に用いた2入力1出力のネットワーク回路を示す。図4の出力信号を各シナプスからの信号として取り込み、マイコンの中で積和演算をする。パーセプトロンアルゴリズムに基づいて誤差関数に応じたシナプスワイヤーを成長させる。2本のワイヤーが並行に走っているのは、学習は重みの増減が行う必要があり、ポリマーワイヤーの成長はコンダクタンスを増加させるのみの方向であり、成長したポリマーのコンダクタンスを減らす方法は

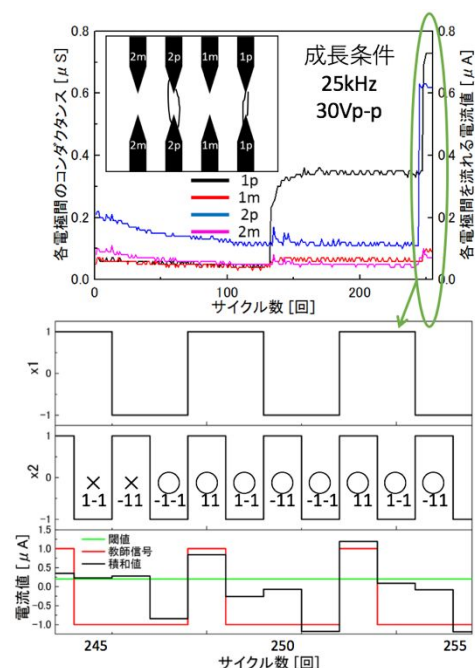


図7 学習によって作製したANDゲート

今のところない。よってコンダクタンスは一つの配線に付き、2本の並列なワイヤを配置し、その差を重みとする。この方法は一般的なニューラルネットワークでも用いられている一般的な手法である。本装置を利用することで、基本論理回路であるAND, OR, NAND, NOR ゲート回路を作製することが出来た。

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)

〔学会発表〕(計 7件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

赤井恵 (AKAI-KASAYA Megumi)

大阪大学工学研究科・助教

研究者番号：50437373

(2) 研究分担者

浅井哲也 (ASAI Tetsuya)

北海道大学情報科学研究科・教授

研究者番号：00312380