

高密度電極アレイを用いた培養神経細胞による実環境ロボットの構築

Designing Cultivated Neural Robot in Real Environment with High Density Microelectrode Array

丸山典宏^{*1} 升森敦^{*2} 池上高志^{*1}
Norihiro Maruyama Atsushi Masumori Takashi Ikegami

^{*1}東京大学 総合文化研究科
The University of Tokyo Graduate School of Arts and Science

^{*2}東京大学 学際情報学府
The University of Tokyo Graduate School of Interdisciplinary Information Studies

Robot experiments using neural networks as controllers are a popular method for investigating the importance of embodiment to life and intelligence. To research the importance of synaptic plasticity on learning and memory, we designed a system in which a robot in a real environment is controlled in real time by a population of cultivated neurons. The neural network interacts with its environment in a closed loop, via sensors on the robot and an electrode array to read and send signals to the neurons. Our system has the advantage of a high spatial and temporal resolution.

1. はじめに

人工生命・人工知能の研究において人工ニューラルネットワークを用いたロボットによる実験手法は、仮想環境・実環境を問わず、記憶・学習といった機能や合目的な振る舞い、知的な振る舞いや認知現象にいたるまで、身体性の重要性に関する研究に利用されている。しかし、実際の神経細胞が身体性を通じて環境と相互作用しながら、記憶や学習といった機能を実現するプロセスは解明されていない点も多い。そこで近年では、実際の培養神経細胞をロボットに相互接続し、その動きをコントロールする実験が盛んに行われている。例えば S.M.Potter らのグループによる Animat は、電極アレイ上で培養した神経細胞の発火パターンとロボットの位置情報を用いて Closed loop を形成し、合目的な振る舞いを行わせる実験を行っている [Chao et al. 2008]。また、林らはファイインターフェースを用いたシステムによりロボットの走行実験を行い、神経細胞の学習機能に関する議論を行っている [Hayashi et al. 2008]。

これらの先行研究においては、神経細胞の動きを記録した刺激を与えるために電極アレイが使用されている。しかし、この電極アレイは空間解像度が低いため、個々の神経細胞の動きを検知する事は難しく、神経細胞単体を狙った刺激を与える事も困難である。そこで本研究では、神経細胞の発火の時系列パターンを比較的高い時空間解像度で観察できる CMOS を用いた高密度電極アレイを利用し、それによって実空間上でロボットをコントロールするシステムを構築した。

2. システム

本研究で提案するシステムは、CMOS を用いた高密度電極アレイ (HDMEA)、その活動の記録・スパイクの検出・神経細胞への刺激を行うソフトウェア、神経細胞からの信号とロボットのインターフェースとなるソフトウェア、実際のロボットと

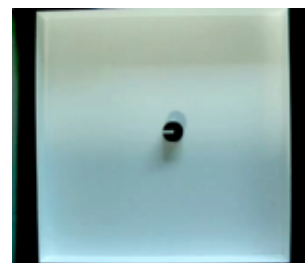


図 1: 実験に使用したロボット (Elisa-3) と実験の様子

からなる。神経細胞は CMOS 上で培養され、その活動はリアルタイムに観測する事が出来る。観測された神経細胞の活動からスパイクを検出し、それを基にロボットのモーター出力を決定しロボットを走行させる。一方、ロボットのセンサーインプットからは神経細胞への刺激の有無・強さ・位置を決定し、その都度刺激を与える。以上のフィードバックループによりロボットは環境の情報に基づき動き回ることができる。図 2 にこの概要を示した。以下では本システムを構成する各モジュールについて詳述する。

2.1 培養神経細胞と高密度電極アレイ

本研究で用いる高密度電極アレイは先行研究で用いられているものと比較して時空間分解能が高いことが特徴である。一般的な電極アレイの電極数が数十個であるのに対して本研究で用いているものは 11,011 個であり、各電極のサイズは直径 $7 \mu\text{m}$ 、電極間の距離は $18 \mu\text{m}$ となっている。これらの電極の中から、最大 126 個のチャンネルを選択し、同時に観測する事ができる。そのため、神経細胞の数を 120 個程度になるように調整し、使用するチャンネルを適当に選択する事により、ほぼ全ての神経細胞を個別に観測する事が可能である。また、126 チャンネルの中から最大で 2 チャンネルに同時に刺激を与える事ができる。

記録・制御には、多電極ハードウェアのリアルタイム処理などに用いられる D. Wagenaar らによるソフトウェア、MeaBench[Wagenaar et al. 2010] を利用した。MeaBench に

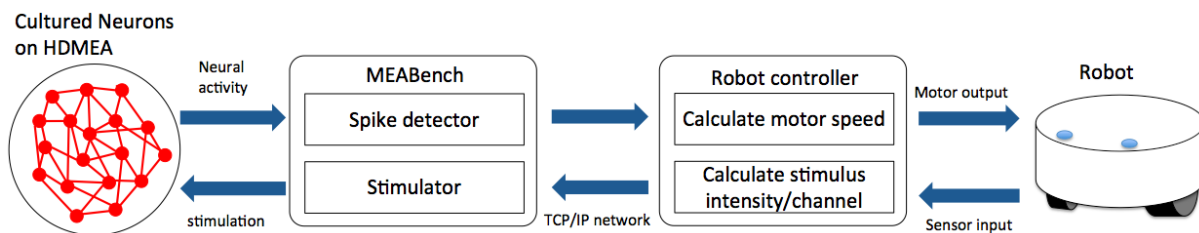


図 2: システム全体の概要

よって高密度電極アレイで検出した電位情報から神経細胞のスパイクを検出し、どの細胞が発火したかの情報を TCP/IP ネットワークを経由してリアルタイムでロボットコントローラーへと送信する。一方、ロボットコントローラーからは神経細胞への刺激命令が送られてくるので、それに基づき適切なチャンネルへと刺激を与える。

2.2 ロボット

実験に使用するロボットには Elisa-3 (GCtronic 社製) を採用した (図 1)。Elisa-3 は直径 5cm の円形のロボットで、2つの車輪を独立に制御することで動き回ることができる。また、搭載されている複数のセンサーのうち、左前方及び右前方の2つの距離センサーの値をシステムへのインプットとした。

2.3 ロボットの制御

ロボットコントローラーは、100msec 毎に発火した神経細胞の位置と数に応じて、ロボットのモーター出力を更新する。神経細胞全体から左右のモーター出力用に 20 個程度ずつの細胞を重複無く選択し、これを $N_{l,r}$ とする。神経細胞 i の値 v_i は、時間内の発火回数であり整数値をとるとすると、ロボットの左右のモーターの速度 $V_{l,r}$ は、

$$V_{l,r} = \sum_{i \in N_{l,r}} \omega_i v_i - C$$

によって決定される。ここで、 ω_i は各神経細胞の重みであり、本研究では i によらず一定とした。また、 C は正の定数であり、これによって神経細胞の発火数がある閾値より少ない時はロボットは後進し、頻繁な発火が起こった場合は前進する。

一方、コントローラーはロボットのセンサーからの情報を取得し、これに基づき刺激すべき CMOS のチャンネル (= 神経細胞) の情報を、同様にネットワーク経由で刺激の制御プログラムへと送る。

ロボットは左右斜め前方の距離センサーで得られる壁からの情報を取得し、それに基づき神経細胞への刺激の有無・強弱を決定する。具体的には、ある閾値よりセンサー入力が高い (障害物との距離が近い) 場合に刺激を与え、その頻度はセンサー入力値の強さに依存して変化させる。刺激する神経細胞は固定として、右センサー及び左センサーに 1 つずつ割当てたが、その際には興奮性の神経細胞を選択するようにした。

3. 結果・考察

ロボットの動きを検討するために予備的な走行実験を行った。600mm 四方の壁で区切られた空間にロボットを配置し、10 分間の動作の軌跡を記録した。図 3 に実験を通してのロボットの軌跡と滞在時間のヒストグラムを示す。

本研究では、ロボットが壁などの障害物にどの様に反応するかを確認するのみの予備的な実験に留まり定量的な解析はな

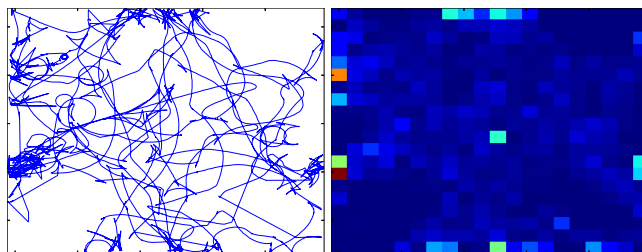


図 3: ロボットの軌跡と滞在時間のヒストグラム

れていないため具体的な議論はできないが、ロボットが壁に反応してしばらく留まった後に別の領域に移動していく様子を見ることが出来る。

現状では、短時間の走行実験に留まっているが、本システムを用いればより長時間の記録も容易である。また、神経細胞の発達を追いながらの実験も可能であるため、神経細胞が環境との相互作用のなかでどのようなネットワークの発達をするのかを観察する事を目指す。これにより、神経細胞ネットワークのダイナミクスやその発達がどのように記憶・学習といったメカニズムに関連しているかといった研究に貢献する事ができると考えられる。また、従来のシミュレートされた神経細胞や工学的なニューラルネットワークとの比較より、実際の神経細胞の可塑性が身体と結びついた時に有効性を発揮するのか、またそれがどのようなものなのかといった研究への発展も期待できる。

参考文献

- [Frey et al. 2010] U.Frey, et al.: Switch-Matrix-Based High-Density Microelectrode Array in CMOS Technology, IEEE Journal of Solid-State Circuits, 45(2): pp.467–482, (2010).
- [Hayashi et al. 2008] 林 勲, 徳田 農, 清原 藍, 田口 隆久, 工藤 卓: 生体表現システム: ファジィインタフェースを用いた培養神経回路網とロボットと相互接合, 日本知能情報ファジィ学会誌, 23(5), pp.761–772, (2008).
- [Wagenaar et al. 2010] D.Wagenaar, T.B.DeMarse and S.M.Potter: MeaBench: A toolset for multi-electrode data acquisition and on-line analysis, Neural Engineering, 2005. Conference Proceedings. 2nd International IEEE EMBS Conference on. IEEE, (2005).
- [Chao et al. 2008] Z.C.Chao, D.J.Bakkum, and S.M.Potter: Shaping Embodied Neural Networks for Adaptive Goal-directed Behavior, PLoS computational biology 4(3), e1000042, (2008).