

ニューロ・ロボットにおける in vitro 学習

In vitro learning of neuro-robot system.

工藤 卓	徳田 農	清原 藍	田口 隆久	林 勲
Suguru N. Kudoh	Minori Tokuda	Ai Kiyohara	Takahisa Taguchi	Isao Hayashi
産総研	関西大学	産総研・大阪大学	産総研・大阪大学	関西大学
AIST	Kansai U.	AIST/Osaka U.	AIST/Osaka U.	Kansai U.

Abstract: Rat hippocampal neurons were cultured on a dish with 64 micro planer electrodes. A complex network of neurons was formed and the network was able to distinguish patterns of action potentials evoked by different electrical current inputs. We integrated a living neuronal network and a Khepera II robot or robot made by LEGO mindstorm NX kit as a body for contacting to outside world. Using self-tuning fuzzy reasoning, we associated a distinct spatial pattern of evoked action potentials with a particular phenomenon in the outside of the culture dish. We succeeded in performing collision avoidance behaviour with premised control rule sets. During collision avoidance, the responding pattern of evoked action potentials was stable and robust against perturbation to spontaneous network activity. These results suggest that a cultured neuronal network can represent particular states as symbols corresponding to outside world.

1 クオリアを持つ認知主体

実世界において安定して動作する完全自律エージェントの実現が難しいのは、フレーム問題、記号接地問題等の解決を前提とするからである。これらの問題に関しては身体性認知科学の枠組み、即ちサブサンクション・アーキテクチャのような、「身体性」をベースとした手法が非常に有効であることは明らかである。さらに踏み込んで、「人間のように動作するロボット」を実現するために必要とされ、かつほとんど解決の目処が立っていない機能は、やはり「心性」ということになるだろう。心を持つロボット、それはパートナーロボットのような、人間の心理的な相手となるロボットには必須の機能である。また「心的印象」は、AIのような言語的な記号操作と実世界の概念を自律的に融合する枠組みとして重要である。

外界からの感覚入力に対するある心的な印象は「クオリア」と言われている。この術語は現在非常に広範な意味で使用され、混乱しているように思われが、そもそも明確にして本質的な定義がなされている。ここでは、ルイスがその著作 *Mind and the world order* で定義した「クオリア」による [1]。この定義では、クオリアとは我々が受容した事物の質的な特徴が引き起こした心的現象であり、「～の感じ」とでも表現する以外にない感覚的なものである。ある対象についてのクオリアは様々な異なる体験のなかで、繰り返し生じる普遍的な関係性であり、その対象と受容された経験との関係に再現性があるということのみ定義される。つまり「青」を何度もみたときに必ず感じられる普遍的な「あの感じ」こそがクオリアである。非常に重要なことは、その生成メカニズム自体が 定義の中に暗示されている ということである。

ここで強調されているのは「関係性」と「再現性」であ

る。脳の反応は外界の事物と直接的に結合しておらず、外界の事物は脳の内部のある状態をトリガーするのである。ある事象に対する脳の内部状態に再現性がある、これを 内部観測 したものをその事物に対するクオリアと定義するのである。このことは、つまり感覚器や、身体全体が関わる「経験」抜きにクオリアは定義できないことを示し、即ちクオリアは、その初期の定義からして「身体性を前提」としている。より具体的にはクオリアの「質」は、「認知系を構成する各要素間の関係性」をテンプレートにして外界が区分され、区分された外界に対応する（再現される関係性がある）「認知系内部の要素」の、要素間の関係性 によって規定される。外界と、対応する内部要素の関係の「再現性」が本質である。再現性を強調して表現するならば、クオリアとは関係性の履歴の総体であると言える。

このようなクオリアを持つ認知主体最小構成を実現するために必要な要素は、「感覚器」、「効果器」とこれを結び「多階層の履歴性を持つネットワーク構造」が必要であると考えられる。これは、身体性認知科学の枠組みをベースとし、「履歴性」と「ネットワーク構造」が強調されたものである。生物の脳を構成する神経系は、単一細胞レベルのミリ秒スケールの履歴、ネットワーク・ダイナミクスによる数秒程度持続する一時的な履歴、シナプス可塑性による秒から日程度の中長期の履歴、ネットワーク構造の物理的改変を伴う長期的な履歴と、多様な時間スケールの履歴性を有している。この階層的履歴性こそが神経回路網の内部状態を豊富にし、外界からの入力に対して内部状態依存性の非一様な反応を生成する源泉である。このような揺らぎを内包した内部状態の変動によって、同じ入力に対して全く同じ応答を返さないのが神経回路網の重要な特性である。

単一細胞レベルの履歴の相互作用によって系の内部状態が動的に形成され、その結果この系の電気活動パター

ンが変動し、変動した活動パターンにより、別の内部状態が生成される。このように同一の入力に対しても神経回路網の活動電位パターンは試行ごとに異なっている。この内部状態の変動は細胞間の相互作用に依存するが、この相互作用の様式は神経回路網のグラフ構造によって制限されるので、その変動は一定の範囲に収束している。さらに着目すべきは、ネットワーク構造によって履歴的反応が物理的な構造と相互作用する枠組みが実現されていることである。神経電気活動のダイナミクスという時系列構造を空間的なスタティックな構造に変換する、あるいは逆方向に変換する仕組みとして、神経回路網には「ネットワーク構造」と「階層的な可塑性」が備わっていると考えられる。細胞内でこのダイナミクスと物質、機能蛋白質分子の挙動の橋渡しを担っている重要な分子は Ca^{2+} である。繰り返される強い脱分極は細胞内 Ca^{2+} の上昇を促し、 Ca^{2+} 濃度が上昇すると活性化する蛋白質キナーゼ (CAMKII や PKC など) によって、シナプス伝達効率を変更する各種の機能蛋白質分子の発現や細胞形態の変更が誘導されて細胞間の機能的な結合様式が変更される。高次の履歴によって、神経回路のグラフ構造が変更され、系の状態は大きく変更されることになる。このような時間スケールの異なる履歴と物理的な構造が相互作用しながら系の出力を常に調整している。系の変更が次の状態を規定し、この状態そのものが次の瞬間、新しい状態にとっての参照すべき履歴に変わる。つまり、この系は常に過去の自己の状態を参照して外界からの入力と過去の履歴を相互作用させながら、系自身に変更され続けるという様式で作動している。これはそのまま生物の枠組みそのものであり、認識を形成する仕組みが生物の構成様式や行動と一致していると言うのは大変自然である。

2 Vitroid のデザイン

2.1 Vitoroid Concept

我々は最も実験的知見の多いラット海馬神経細胞を用い、2次元多点電極皿上に培養して、生体神経回路網 (Living Neuronal Network; LNN) を構築した (図 1)。培養手法と電気生理学的手法に関しては既報を参照されたい [2]。神経細胞は、培養開始後 7 から 10 日程度の間その一部が脱落するが、培養開始後 2 週間目程度からは比較的その数が安定する。他方グリア細胞の数は、培養初期に急激に増大するが、その後も微増を続ける。神経細胞数は安定するが、シナプス形成と神経突起は増大し、複雑化し、これは電気活動パターンの培養日数依存的な変化にも現れている。この LNN は、特定の電極からの定電流刺激に対して、揺らぎを持ったほぼ一定の時空間活動パターンを発現した。外界からの一定の入力

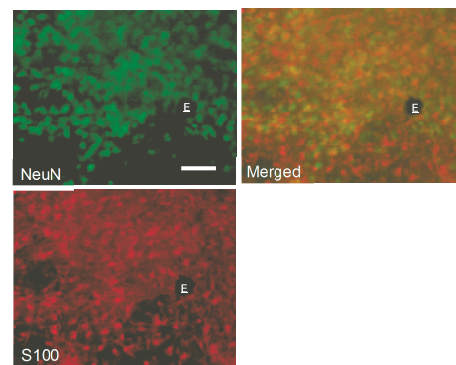


図 1:

胚齢 18 培養 18 日目の LNN の免疫組織染色像。E は電極を、白線は $100\mu m$ を示す。NeuN は神経細胞の核の染色像、S-100 はグリア細胞の染色像、Merged はその合成である。

を繰り返したとき、ある程度一定の神経活動を再現性よく起因するならば、これはクオリアを構成する神経アセンブリを形成しうる第一義の条件を満たすことになる。

そこで、LNN がセンサとアクチュエータを備えたロボット・ボディを介して環境と相互作用する枠組みを確立した。このような、分散培養系が Closed-Loop な系で環境と相互作用するシステムとしては、Potter らの Hybrot が最初の報告である [3]。Hybrot では、一定時間ごとに LNN に加えた電流刺激 (探索刺激) によって誘発される複数の神経細胞の活動電位頻度を計数し、これを元にロボットを制御する。これに対し、我々の用いた手法は以下の 2 点で大きく異なるパラダイムによって

- 1) 持続的な探索刺激を行う代わりに、実際に感覚センサが活性化したときのみ LNN を刺激する。
- 2) 我々の枠組みでは、自発的活動電位とセンサ入力による誘導活動電位を区別しない。自発的活動電位は、系の内部状態を反映し、自発的活動や試思考に相当するものとする。

自発的活動電位は、それまで系に投入されてきた外界からの入力の履歴と、'ゆらぎ'を含んだ内部状態であり、単なるノイズではないという立場である。LNN を制御することをせず、あくまで LNN の「自発的な内部状態」が情報処理の主体となっており、システムの動作を決定する主体は LNN とする。また、LNN の内部状態は外部の環境環境と単純なパターン対応によって緩やかにリンクする。このような枠組みを、我々は新たに「Vitroid」として定義する。つまり、「Vitroid」は「Hybrot」の一形態であるが、制御コンセプトは Potter のものとは全く異なるものである。Vitroid では、神

経活動パターンは外界と一対一対応に結びついているのではなく、外界の事象は関連する LNN の内部状態をトリガーするのみである。その関係性は純粋に再現性によって成立し、これは丁度クオリアの定義と重なっている。

2.2 Vitoroid の構成

Vitroid は、LNN、ロボット・ボディ、制御コンピュータ、細胞外電位多点計測・刺激システムのハードウェアと、5つの制御ソフトウェアからなる。環境と相互作用するロボット・ボディは、KheperaII もしくは LEGO Mindstorms NTX を用いて組んだものを用いた。細胞外電位多点計測・刺激システムは MED64 システム (MED Sciences) を用いた。計算負荷を 2 台のコンピュータに分散させるため、処理を 5 つの独立したプログラムに分割し、データ・ソケット・サーバー (National Instruments) を経由して相互に通信させた (図 2)。我々

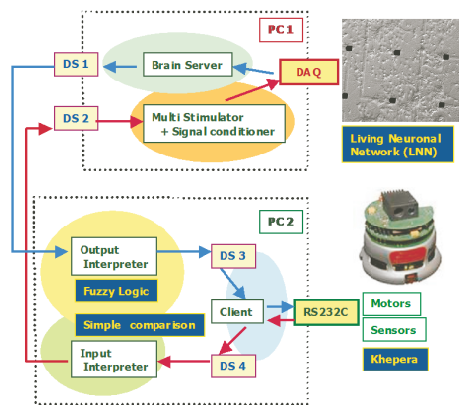


図 2: Vitroid の構成図

は、Vitroid に合目的的行動を取らせるために、行動ルールをセンサーとアクチュエータのカップリング規則に埋め込んだ。これは身体性認知科学によるエージェントの設計と類似している。

入出力変換のためのアルゴリズムは様々なものが使用可能であるが、現時点では入力変換器にはセンサ値の単純な分割合計、出力変換器には簡略ファジィ推論を用いている。入力変換では、KheperaII のもつ 8 個の IR センサのうち前面の 6 個の IR センサを左右領域に分割し、それぞれの区分でセンサ値を合計して比較する。この結果から、左、もしくは右に障害物があるとして、それぞれの状況に対応させた電極から LNN へ電流刺激を行う。出力変換では、適宜選択した 8 つの電極に於いて時間窓 50 ms ごとに活動電位発生回数を計数し、これにより構成される空間パターンを簡略ファジィ推論を用いて識別する。

識別するパターンとアクチュエータの目標速度との間には数値的關係性が無いので、ファジィルールの後件部実数値を学習により調整することで LNN 活動パターンとアクチュエータ出力値の間に数値的關係性を構成した。具体的には、8 入力に対し、高頻度 (H)、低頻度 (L) の 2 種類ファジィラベルを設定し、全ての H、L の組み合わせで 256 の前件部を構成した。この共通の前件部に対し、左アクチュエータと右アクチュエータの出力を実数値で後件部値として設定した。つまり、256 ルールによって構成されるファジィ制御器を 2 個並列に配置し、学習の教師信号の与え方にこの 2 ファジィ制御器を関連付けている。各アクチュエータ出力初期値を 5 とし、左障害物に対応した刺激を LNN に入力するときに左アクチュエータ出力値の教師信号を 10、右アクチュエータ出力値の教師信号を 1 とした。右障害物信号の場合は全て逆になる。このような学習方法で合計 150 刺激を行ってファジィ推論器の出力を調整した。各ルールの前件部により構成されるパターンがテンプレートとなり、これと入力された信号の類似度によって適合度が決まる (図 3)。

出力は各ルールの後件部実数値の、適合度による重み

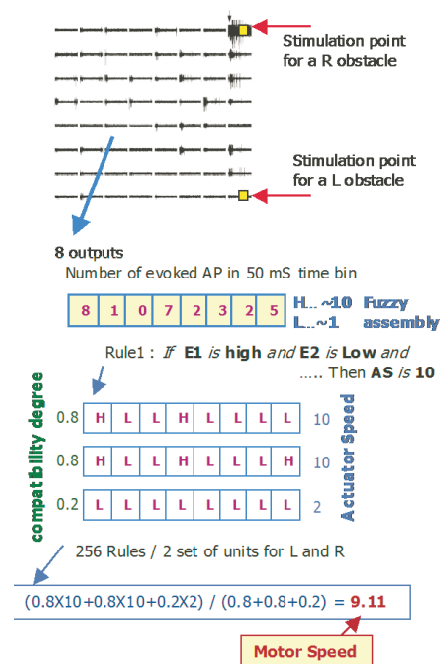


図 3: 簡略ファジィ推論の実装

付け平均になっている。学習ではこの重み付け平均値を評価して教師信号と比較し、適合度に応じて後件部実数値を調整するため、センサ入力により誘導される活動電位に近いパターンを構成するルールの後件部値が増加する。ただし、このパターンが反対の入力 (左に対して

は右) によって誘導される活動電位パターンに対して分離度が低ければ、後件部値の修正は相対的に抑制されることになる。

3 衝突回避行動

ファジィ推論器の後件部値を学習により調整した後、ロボットが想定した衝突回避行動を発現するか検証した。テストコースは全長 100mm, 幅 90mm で、コース両側に外壁を設置し、ロボットが外壁に接近して衝突しそうになるとこれを回避することを目標とした。ロボットを中央線上に配置して走行実験を行った結果、図 4 に示されているようにロボットは衝突回避を行い、壁にぶつかることなく蛇行的に走行した。図中、上段に示されているダイアグラムは、Client が「L 刺激」、「R 刺激」、あるいは電流刺激無し「SPT」のいずれの信号を送ったかを示し、下段は 8 電極から得られた活動電位頻度を示す。センサ入力に神経回路網に加えられた場合には、いくつかの特徴的な活動電位パターンがある幅を持った再現性を持って出現した。他方「SPT」で示されている刺激無しの自発活動においては、バリエーションに富んだ活動パターンが見られた。興味深いことに、各電極で検出される活動電位頻度のばらつきがテスト走行の比較的短い時間内で変化していた。図 5 は、テスト走行を初期 (E)、中期 (M)、後期 (L) の 3 区間に区分し、それぞれの区間内で左対応刺激、右対応刺激、及び自発活動に於ける 8 電極で記録されたそれぞれの誘導活動電位頻度の変化を示したものである。各電極に於いて検出された、センサ入力により誘導された活動電位頻度の時間方向のばらつきは、コース走行中に減少した。他方、センサ入力によらず自律的に発生する自発的活動電位の頻度分散値は明確に変動しなかった。

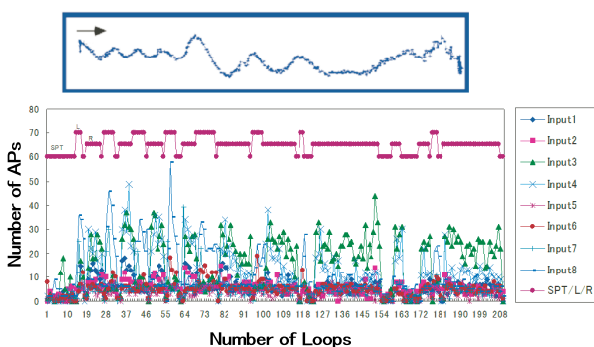


図 4:

Vitroid の衝突回避行動の例。上段がロボットの軌跡を示し、下段のグラフは 8 電極から記録された神経活動電位頻度の時系列変化を示す。

精々数十秒の走行時間のレンジで、LNN の応答特性に何らかの履歴的な変動が生じており、これが自発的活動とセンサ入力による誘導活動で分離しているということである。数分時間を空けて引き続き実験を行うと、このばらつきは初期の状態に戻っていた。各入力信号はいくつかの神経細胞から入力を受けた神経細胞の活動であると仮定すると、この分散が減少するということは、出力合成器としての神経回路網がアンサンブル学習を行ったということを示唆する可能性がある。

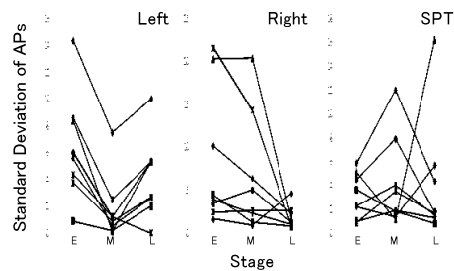


図 5:

活動電位頻度の標準偏差の時系列変動。

4 結論

分散培養神経回路網にロボットボディを接続し、神経活動パターンと外界の事象を直接的にカップリングした系 (Vitroid) を構築した。衝突回避を行うように Closed-loop を構成するパラメータを調節した Vitroid は、実際に簡単な衝突回避行動を発現することに成功し、短い時間範囲で神経回路網の活動パターンが可逆的に変更された。この結果は Vitroid の LNN が教師無し学習を行った可能性を示唆する。

参考文献

- [1] C.I. Lewis: Mind and the world order *C. Scribner's Sons, New York* 1929.
- [2] Kudoh S.N., Hosokawa C., Kiyohara A., Taguchi T. and Hayashi I. Biomodeling system - interaction between living neuronal networks and the outer world. *J. Robotics and Mechatronics*, 19(5), pp.592-600, 2007.
- [3] Z. C. Chao, D. J. Bakkum and S. M. Potter: Shaping embodied neural networks for adaptive goal-directed behavior. *PLoS Comput Biol*, 4, 3, e1000042, 2008.

連絡先

工藤 卓

E-mail: s.n.kudoh@aist.go.jp