



# Robot Control with Biological Cells

津田, 宗一郎

---

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

2007-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲3911

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1003911>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【 2 6 3 】

氏 名・（本 籍） 津田 宗一郎 （ 奈良県 ）

博士の専攻分野の名称 博士（学術）

学 位 記 番 号 博い第668号

学位授与の 要 件 学位規則第5条第1項該当

学位授与の 日 付 平成19年3月25日

【 学位論文題目 】

Robot Control with Biological Cells  
（生きた細胞を用いたロボット制御）

審 査 委 員

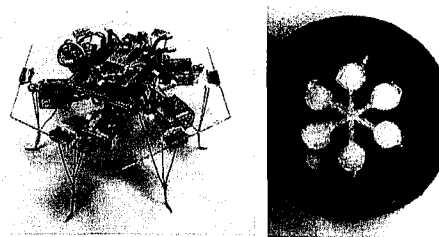
主 査 教 授 郡 司 幸 夫  
教 授 兵 頭 政 幸  
教 授 中 川 義 次  
助教授 小松崎 民樹

本研究の目的は生物の細胞を計算システムにおける情報処理に用いることの可能性を探ることにある。これまで、既存の計算システム（コンピュータ、ロボットなど）ではより柔軟な情報処理を目的として、ニューラルネットや遺伝的アルゴリズムなどの生物学的知見が利用されてきた。しかしながら、現在のシリコンをベースとするコンピュータ・アーキテクチャは非常に安定的である一方で、1つの回路の故障によって全体のシステムが動作不可能になるなど、デバイスの構成要素の完全制御が必要とされている。しかし、生物においてはそのような完全制御よりもむしろ自己組織化や自己修復などの構成要素の物理的特性（タンパク質などの生体内物質の特性）を利用することで、複雑な環境下においても外的雑音に対して頑健であり、かつ環境の変化に対しても適応的に振る舞うことが可能となっている。また、現在のシリコンを用いたコンピュータ・アーキテクチャは今後数十年以内に物理的にも生産コスト的にも限界に到達することが指摘されており、その代替デバイスまたはその補完的デバイスの候補として生物素材を用いた計算システムの開発も進められている。しかしながら、生物素材はシリコンに比べ可塑的であると同時に不安定な物質であり、既存の計算概念をそのまま適用し開発を進めることは難しい。以上のような理由から、生物または生物素材を用いたより柔軟なコンピュータ・アーキテクチャの開発と「より生物らしい計算概念」の構築が必要であると考ええる。そこで、本研究では真正粘菌変形体（以下、粘菌）を用いてロボット制御を実現することを目的とする。ロボット制御、特に実世界において動作するロボット制御の問題は計算システムに関する研究の中でも難しい問題である。なぜなら、実世界との相互作用は常に不確定な要素が入り込む可能性を潜在させており（これらはフレーム問題、記号接地問題などとして指摘されている）、上記の完全制御の計算概念ではその不確定要素に対応しきれず、実現が難しいからである。また、このような理由から、アーキテクチャの物理的特性や自己組織能力などを活用しようとする新たなロボット・アーキテクチャや計算概念の模索が積極的に進められている分野であり、本研究の目指す方向性を議論する上で親和性が高いと考えられる。実際、たとえばバクテリアのような単細胞生物であろうともこの不確定要素を何らかの形で対処しているわけであるから、「生物らしい計算」を考える上でこの点は重要なポイントとなる。実際に設計された細胞を用いたロボット・システムは以下ようになる：

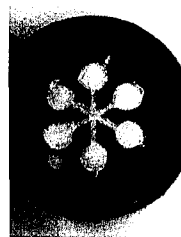
まず、このロボットシステムは3つの構成要素から成る。

- (1)：ロボット
- (2)：粘菌回路
- (3)：上記2つのインターフェース

(1)のロボットは、六角形のボディーに6つの光センサーと6本の脚を備えた無方向性ロボットである（図1）。6本の脚の動作パターンによってさまざまなロボットの行動パターンが生成される。(2)の粘菌回路は、6つの頂点を持つ放射状パターンの内部に閉じ込めた粘菌である（電気回路などと接続されているわけではないことに注意）。(3)のインターフェースについては双方向であるため、粘菌→ロボット方向のインターフェースとロボット→粘菌方向のインターフェースがある。まず、粘菌→ロボット方向のインターフェースについて解説する。このインターフェースでは、(2)の粘菌回路の各枝の先端にある円形の部分（粘菌振動子部と呼ばれる）と、ロボットの各脚とが1対1対応することになる。粘菌振動子では、この部分の内部にある粘菌はほぼ位相が同期した細胞の厚みの周期的振動リズムが観測される。粘菌はこの細胞全体に渡る周期的振動リズムを利用して外部刺激の情報処理を行っていることが知られており、粘菌回路ではこの振動リズムを周期的パターン・ジェネレーターとして利用している。各粘菌振動子における振動リズムは、振動子間をつなぐ経路（チャンネル部と呼ばれる）を通じて相互作用しており、それによって各振動子の振



(図1)



(図2)

動リズム、そして細胞全体の振動パターンは動的に変化する。これらの振動リズムはCCDカメラによって観測され、PC上に記録される。この観測データに基づき、ロボットの各脚の振動パターンが決定され、脚が実際に駆動される。6本の脚の駆動パターンによってロボット全体としての運動が決定される。

逆に、ロボット→粘菌方向のインターフェースについては、ロボットの光センサーと粘菌振動子が1対1対応する。また、このインターフェースは非常に単純な構成をしており、ロボットの光センサーに対する入力はそのまま対応する粘菌振動子への光刺激へと変換される。光刺激は粘菌にとっては忌避刺激として働くため、振動子の振動リズムは変化させられることになる。このリズムの変化はチャンネル部に存在する粘菌を通じて他の振動子部へと伝えられ、振動リズムの変化を促すことで細胞全体の振動パターンは変化することになる。以上のような形で粘菌とロボットの間のインターフェースは実装され、これによって粘菌、ロボット、そして環境の3者が相互作用するロボット・システムが実現される。

このシステム全体の動作を確認する前に、ロボットの実際の動作に基づいて作られたロボット・シミュレータによって粘菌→ロボット側のインターフェースの動作を確認した。複数の粘菌振動子に光照射を行った場合の動作は以下ようになる：粘菌は光刺激に対して逃避行動を示すことが知られている。複数の振動子への光照射の場合、照射部の粘菌（すなわち粘菌振動子部）は刺激直後より「厚み振動の振幅」と「細胞の厚み自体」が減少する。それに対応するように、他の光照射されていない粘菌振動子では、これら2つ（振動の振幅と細胞の厚み）がともに増大する。これは、照射された振動子から流出した原形質のバフファとして刺激されていない振動子が働いていることを意味する。これらのデータの値の大小によってシミュレータの脚の振幅の大きさが決定される。実際の動作としては、光刺激によって振幅と厚みが減少した振動子に対応する脚はあまり動かず、逆に光刺激を受けていない振動子に対応する脚ではより大きな動きが生成される。結果的に、ロボット全体の挙動としては、実際の粘菌の挙動のように、光刺激のある方向からの逃避行動を示すことになる。また、実際のロボットにおいて基本的に同じアルゴリズムを用いて動作させたところ、やはり逃避行動を示すことがわかった。

次に、システムの柔軟性を必要とする状況についての実験を行うため、全粘菌振動子への光照射実験を行った。上記の複数の振動子への でわかったことは、特定の「入力」に対する決まった「出力」が粘菌に存在する、ということである。これは、粘菌をなんらかのプログラムとして考えるのであれば、まさに既存の計算概念において理解されるものでしかない。上でも述べたように、生物を計算システムとして使う上で重要となるのは適応能力、不確定要素に対する対処能力である。これを考えるためには粘菌の機械的な行動（すなわち、光刺激に対する逃避行動）が成り立たない状況において、粘菌がどのように振る舞うか、と言う点について見る必要がある。そこで、全ての粘菌振動子に光を当て、という条件での粘菌回路の反応を調べた。この場合、刺激されていない粘菌振動子は存在しないため、刺激された振動子から流出した原形質のバフファとして働く部分は存在しない（正確にはチャンネル部は刺激されていないが振動子部の面積に比べ非常に小さいため十分なバフファとしては働かない）、そのため複数の振動子を刺激した場合での反応は起こり得ない。

この実験の結果、粘菌は通常の反応だけでなく、さまざまな反応を見せることがわかった。通常では光からの逃避行動は照射直後に起こるが、今回の場合では照射中にさまざまなタイミングで起こることが確認された。また、振動の振幅も振動子毎によって、大幅に減少するものからほとんど影響をうけないものまで、さまざまな場合が見られた。これをロボットの挙動に変換したところ、多くの場合はほぼランダムと言える挙動を見せたが、ある場合では、1方向運動を生成するという、創発的な挙動が見られた。

(氏名： 津田 宗一郎 NO. 3)

以上の実験によって得られた振動パターンを評価するため、粘菌振動子に対するメトリック・エントロピーを求めた。これによって2値化された粘菌の振動の「安定度」を評価することができる。もし振動が安定しているのであれば、粘菌の振動のエントロピーはある一定の値を取り、不安定化しているのならばそれより高い値を取ることになる。まず、粘菌回路全体のエントロピー（6つの振動子のエントロピーの合計）に関して調べた所、複数個の振動子を刺激する場合は、刺激前とのエントロピーの値の差がほとんど無いという傾向が見られたのに対し、全照射実験の場合は刺激中はエントロピーが高くなるという傾向が見られた。また、各振動子のエントロピーについて刺激前と刺激中それぞれ200ステップについてのエントロピーの平均と分散をプロットしたところ、複数個の振動子を刺激した場合では刺激中の点のばらつきが刺激前と比べて小さくなったのに対し、全照射の場合では大きくなる傾向が見られた。これは、複数個刺激した場合では振動子は機械的な反応を見せている一方で、全照射刺激の場合では振動子はさまざまな反応をそれぞれで行っていることを示唆するものである。これらの挙動の有り得る解釈としては、以下のような説明が考えられる：光に対する粘菌の「通常の反応」が成り立つ場合では粘菌は機械的な挙動を示すが、それが成り立たない場合には内部状態の自由度を上げることによって、違った反応を示すことが可能となっている。

このような挙動は「解釈」（＝入力に対する反応）が設計者によって固定されているロボットでは実現が難しいものであり、これらを利用することによって将来的には極限環境作業ロボットなど、不確定要素が多く存在する環境でも動作可能なシステムの実現が可能になるであろうと考えられる。

(別紙1)

論文審査の結果の要旨

氏名	津田 宗一郎		
論文 題目	Robot Control with Biological Cells (生物細胞を用いたロボット制御)		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	邵 司 孝 天
	副 査	教 授	矢 頭 政 幸
	副 査	教 授	伊 川 義 次
	副 査	即 教 授	小 山 崎 民 雄
	副 査		
要 旨			
概要 申請者は、外界の刺激を表象化・計算し、これに依拠して行動するロボットを構築することで、意識や知能という問題にアプローチしている。この際、外界の刺激をセンサーで受け取って以降、ロボットの駆動部へ計算結果を送るまでの計算処理は、一個の個体である真生粘菌を用いている。計算処理に一個の生きた生物個体（ここでは粘菌）を用いたロボット（粘菌ロボット）は、申請者によって初めて提唱されるものである。粘菌による計算処理によって、従来のシリコンチップ型計算素子とは異なる、計算過程それ自身に起因した、計算素子の物理的特性変化が起こりえる。この計算過程・計算素子特性変化・相互作用が、可塑的で柔軟な計算を実現する。とくにここでは、粘菌ロボットが、パラドキシルな状況に置かれた場合でも、デッドロックに陥らず、それなりに危機を回避する事例を示し、生きている細胞を用いた計算過程の意義について論じている。 第1章では、人工知能、ロボットに関する研究史が論じられ、実在する知能・意識をモデル化する際の問題点を浮き彫りにしている。人工知能の表象主義や、普遍生物学、ブルックスの昆虫型分散ロボットなどの系譜から、部分系を統合しない、緩やかにつながった全体概念が構想され、そのような計算機・ロボット概念へ志向することの必然性が論じられている。 第2章では、外界に対して意思決定するシステムが有すべき柔軟性・可塑性の意義を論じている。とくに、「計算不能な環境下での計算」というパラドキシルな計算過程が、どのような特性を有しているか、明らかにされる。人工知能という概念は、外界の刺激・対象を、システム内部に表象化し、これら表象のつくる内部世界と、システム外部の世界とが同型対応をもって、システムが外界に対応し意思決定できる論拠とした。しかし或る対象を背景から分離し、一個の対象として認識する段階で、すでに様々な意味論が想定可能であり、世界に対して客観的に指定できる表象世界、それを実現する意味論を、唯一つに指定することは不可能である（シンボル・グランディング問題の不可能性）。これに対して、申請者は、シンボル・グランディング問題は克服されるべき問題ではなく、迂回されるべき問題と考え、表象獲得の不完全な学習・調整過程そのものを、意思決定の過程と捉えなおす。こうしてシンボル・グランディング問題を無効にする意思決定過程が構想される。 第3章は、生物型計算機の意義と、粘菌を用いたその実装について論じている。不完全な学習過程を、意志決定過程と考えるとき、汎化によって得られる剰余的な学習が、学習・意思決定に絶えず付き纏い、終わらないという点が重要となる。申請者は、教えられた「刺激・応答」計算と、これを実現することで得られる剰余的計算との積極的関与こそが、柔軟な計算に不可避である、と主張する。ターゲットとなる個別的な学習目標（ターゲット計算）と背後の剰余計算が完全に分離独立であるなら、教えられていない刺激への対応はターゲット計算と全く相関を持たない。これは現実の学習が、一般に、或る種の類似過程を伴なうことに反している。逆に両者が或る規則で決定されているなら、剰余的計算は、実現された学習目標と常に相関をもってしまう。このとき、システムが計算不能に追い込まれた場合、システムは環境に対処できなくなる。剰余計算とターゲット計算は、「関係がある・ない」という極端な形で判定できるものではなく、弱い或る種の全体概念でつながっている。申請者は、この弱い全体概念を担うものとして、粘菌を用いるわけだ。粘菌は原形質流動を通して、刺激（入力）に対し特定の反応（出力）を可能とする。2つの小さな部屋を一本の経路でつなぐ。外部に出られないように、この領域に粘菌を封じ込める。その上で、一方をA、他方をBとし、Aに誘引物質であるグルコースを置くと、BからAへ、原形質が厚みの振動を伴ないながら流れる。逆にAに忌避物質である塩化ナトリウムや白色光などを置くとAからBへ原形質の流動が起こる。二つの部屋に対し一方に刺激を置くと、応答はこのようにほぼ唯一つに決まる。			

氏名	津田 宗一郎
<p>これをターゲット計算と呼べるように、粘菌を、6つの部屋が放射状に中心でつながった二次元パターンに配置する。1つの部屋に刺激（忌避・または誘引）を置くとき、多くの場合その対面側の部屋との間の原形質流動が、ターゲット計算をなす。他の部屋の間をどのように原形質が流動するか、それは環境から設定されることはない。このときターゲット計算に供される原形質も、他の部屋に存在する原形質も、1個の粘菌として接続している。この生物としての個性性ゆえに、或る統一的な運動が出現する事もある。しかしその全体性の弱さゆえに、他の部屋も、「刺激された部屋-対面部屋・対」と同期する場合や、反位相で同期する場合、原形質流動が6つの部屋を回転するように運動する場合、ランダムに振動する場合など、さまざまな場合が出現することが判明した。この挙動は、非線形振動子（ファン・デル・ポール方程式）の結合によって或る程度近似できることも、数値計算から判明した。</p> <p>第4章では、粘菌計算機をロボットに実装したセンサー・モーター系で、生物型計算機の意味が論じられている。6つの部屋から成る粘菌計算機に合わせ、6足歩行ロボットが考案された。ロボットの6本の足は環状に配列され、六角形の基板に接続されている。各々の接続部基板上に、光センサーとモーターが装備されている。この6本の足各々と、粘菌計算機の6つの部屋が対応し、ロボットの6つの方向の光センサーデータは、各々独立に粘菌計算機の部屋へ送られる。ロボットに与えられるのは光刺激のみで、ロボットの或る足が光を検知すると、それに対応する粘菌計算機の部屋に白色光（忌避刺激）が与えられる。粘菌計算機の6つの部屋は放射状に中心でつながっている。したがってロボットの6本の足に与えられた光刺激は、粘菌計算機においてのみ接合され、全体を考慮して反応=計算されることになる。このとき、粘菌上で光刺激をトリガーに、特定の原形質流動が進行することになる。粘菌計算機上では各部屋で、原形質の厚みの変化の傾向を、単位時間当たりで線形近似した直線の傾きで得る。この傾向データを、対応するロボットの足に送り、厚みが薄くなるときにはその足の位置から基盤中心に向かう向き（中心方向）に駆動力を発生するよう足が回転する。逆に厚みが厚くなる傾向を示すとき、基盤中心からその足へ向かう向き（放射方向）に駆動力が生じるよう、足が回転する。或る足に光が与えられ、それに対応する粘菌計算機の部屋の原形質が厚く、対面する部屋で薄くなるとき、各々放射方向、中心方向の駆動力が合成され、ロボットは光から遠ざかるように動くことが可能となる。このように、粘菌計算機によってロボットを制御できることが示された。重要な点は、光を6本の足にすべて提示した場合の挙動である。ロボットと粘菌計算機の制御可能な場合から類推する限り、この状況は計算不能、行動不能な状況意味する。しかし実際には、粘菌の6つの部屋がランダムにモザイク上に振動した後、特定の対面対の部屋間でのみ原形質流動が顕著になり、ロボットは一方方向に歩き続けることが可能となる。これは、当初想定した、パラドキシカルな状況に置かれた場合でも、デッドロックに陥らず、それなりに危機を回避する事例を示すものである。</p> <p>第5章は、振動状況の複雑さに関する解析である。セルオートマトンでは、ビット列の配列の可能性のできるだけ多くを経巡るカオス的な挙動をするもの（クラス3）、局所化した振動のような規則的挙動（クラス1、2）、その中間で局所的振動と情報的大域的伝播を繰り返す複雑な挙動（クラス4）が分類され、生命システムの挙動の本質はクラス4であると言われている。またこれらのクラスは、ビット列の計量エントロピーの平均値と分散の対によって分類可能であることが知られている。すなわち、クラス4のみ、計量エントロピーの平均値も分散も大きい。ここでは原形質の厚みを2値化し、時系列のビット列から時間的計量エントロピーを計算した。光によってうまく制御できるときにはクラス1、2のようなエントロピー平均・分散対が得られ、光を全部屋に照射して、計算不能な状況を作り出したときには、クラス4的な状況が作り出されたあとで、クラス1、2的挙動が出現して、一方向性の運動が生じることが判明した。またクラス4的な挙動でも、程度の小さなもの（中規模のエントロピー平均値と分散対）が、光刺激を与えない平穏期に認められた。これらのことは、粘菌が、通常から不完全な学習・調整を実現することでクラス4的な内的複雑さを作り出し、特にパラドキシカルな状況においてはそれが増幅されること。またクラス4的複雑さの増大によって、一気に特定の局所安定解が得られ、一方向的な運動が実現されることが示された。</p> <p>第6章は結論である。粘菌を計算機として実装したロボットは、絶えずクラス4的複雑さを創り出すことで剰余的計算を付き纏わせ、完全な学習が完遂されない不完全な学習を担い続ける。しかしこの不完全さゆえに計算不能な状況に陥った場合でさえ、或る特定の局所安定解を選ぶことが可能であると述べている。これは危機を自立的に回避する探索ロボットなどに有効であると結ばれている。</p> <p>一個の生きた生物を計算機として実装し、これを制御系としてよってロボットを動かすという試みは世界でも初めての試みであり、同時に不完全な学習・調整過程として意思決定を捉えなおすとい論点はロボット工学・人工生命においても新たな知見であり、論文審査及び最終試験の結果、上記の学位申請者津田宗一郎は、博士（学術）の学位を得る資格があると認める。</p>	