

氏名	吉田 彩乃
学位名	博士（システム情報科学）
学位記番号	第35号
学位授与年月日	平成29年3月23日
学位論文題目	生物の代謝モデルを実装した化学知能ロボットの開発 - 自律的選択と分散・凝集による移動の発現 - Development of Intelligent Chemical Robot with Implementation of Metabolism Model - Expression of Autonomous Selection and Locomotion by Dispersion-Flocculation - Oscillation-
論文審査委員	主査 櫻沢 繁 副査 三上 貞芳 副査 鈴木 恵二 副査 高木 清二

論文要旨

生物が見せる自律性や環境適応的な行動、知能の起源を調べるための研究が多く行われている。創発される運動の観点から自律性や知能を研究している研究手法の一つとして構成論的アプローチがある。この手法では、環境適応性を知能ととらえ、数理的な制御を組み込むのではなく、身体的な制御から創発される知能を扱っている。Pfeifer や石黒らは、その構成論的アプローチに基づいて自律分散ロボットを開発し、創発される運動やその運動から読み取られる知能、自律性などを研究している。その一方で、自律性や知能、運動の創発を調べるためにソフトマターロボットを用いた実験が多くされている。しかし、それらの方法では、ロボットの設計者や実験者が運動の発生源となる刺激や環境の非対称性、ロボットの身体性を設計及び制御する。そして、ロボット自身がその運動の発生源となる刺激や環境に対して影響を与えない。言い換えると、実験者が最初に設定した条件下で外部から与えられた入力信号に基づいて運動しているが、ロボット自身がその入力信号を変化させることはできない。そのため外部から信号を与える必要があり、また、その結果として受動的な運動しか扱うことができなかった。

自律性や環境適応性を研究する場合、しばしば生物が目標となる。生物に目を向けてみると、次のような特徴があると考えられる。1 運動とセンシングのカップリング、2. 運動(セ

ンシング)の基となる刺激を、運動(センシング)を通して環境と関わることで見出すこと、3. 刺激に触れたとき、身体的な形状に非対称性を持つのではなく、化学反応の一方向の伝播などのように身体内に非対称的な情報の流れが生まれること、4. その結果、運動していること、5. 身体と環境の境界が曖昧な中で、運動が実現されていること、の5つである。本研究では、自励振動ゲルを用いて上記の特徴を模擬したロボットを開発し、そのロボットの運動に、生物にみられる様な「運動を通じた環境の知覚」及び「身体と環境が曖昧な中で運動の実現」が見られるか調べた。

そのための実験材料として、本研究では自励振動ゲルを用いた。自励振動ゲルとは、吉田らによって開発された高分子ゲルであり、このゲルでは Belousov - Zhabotinsky 反応(BZ 反応)と呼ばれる周期振動的な化学反応と高分子の物理的な体積の変化がカップリングされている。そのため、化学反応に必要な基質存在下であれば、外部の刺激がなくとも、自身の化学反応に基づいて周期的な膨潤-収縮を見せる。本研究では、この化学反応及び自励振動ゲルに次のような特徴があると考えた。まず、周期が基質の濃度に応じて変化することから、周囲の基質濃度を感受している。加えて、BZ 反応は、周囲の基質を消費することで反応が進む。したがって、BZ 反応では、化学反応が進むことで、基質濃度(環境)が変化する。能動的な運動(センシング)のように、感受によって環境に変化を与えることが可能である。また、この自励振動ゲルでは、化学反応と物理的な体積変化なカップリングされているため、化学反応が体積変化に影響すると同時に体積変化が化学反応にも影響している。これは、生物の特徴の1つである運動とセンシングのカップリングと同等であると考えられる。また、近年、マクロサイズの自励振動ゲルが吉田らによって開発され、マイクロゲルと呼ばれている。このマイクロゲルでは、金属触媒の酸化還元反応に合わせた、膨潤-収縮振動の他に、分散-凝集の振動も実現されている。

本研究では、まず、上記の生物の特徴の中の1, 2, 3, 4を模擬したロボットを自励振動ゲルを用いて開発した。その結果、ロボットは狭空間を避けるまたは狭空間から脱出する振る舞いを見せた。このロボットでは、自身の活動が自身の環境に影響を与えている。そのため、基質の濃度が自らの活動によって変化することで、空間の広さをセンシングしていたと考えられる。次に、上記の1, 3, 4, 5を模擬したロボットをマイクロサイズの自励振動ゲルを(マイクロゲル)用いて開発した。その結果、環境との静電的相互作用を調節しアンカーリングを生み出すことで、一方向の移動を実現することができた。

以上の結果より、物質にも環境の変化を感受する力があることを示唆している。環境適応的なロボットや自律的なロボットをソフトマターで開発する上では、元々物質が持っている変化項を感受する力を生かし、変化を持続することが可能な状況を整えることが重要であると考えられる。加えて、マイクロゲル粒子を用いて作成したロボットは、自分と環境との境界が曖昧なことを利用して運動を実現している。このロボットを自律分散ロボットとみなすと、各モジュール間をつなぐばねが分子間力に置き換わっていると考えられる。この分子間力を利用することで、身体の定義をはっきりさせる必要がなくなり、

環境と身体境界が曖昧な中での運動を実現することができた。

本研究の自励振動ゲルを用いたロボットでは、分子が分解して壊れ、その崩壊を反応物を通してセンシングし、狭空間からの脱出を実現した。このロボットは、分子の崩壊を利用し、空間の広さを認知した。他方、本研究のマイクロゲル粒子を用いたロボットでは、化学反応に合わせて、粒子間のつながりの強さが変化していた。還元状態のときにはつながりが強くなり、酸化状態のときにはつながりがほとんど無くなっていた。このつながりの崩壊と生成を利用して、凝集体として一方向の移動を実現していた。これらの結果より、本研究の両ロボットは、生成と崩壊のカップリングにより存在することを可能にしていたと示唆される。

キーワード: 自励振動ゲル, BZ 反応, センシングと運動のカップリング, 蠕動運動, 生物運動

審査結果の要旨

BZ反応と、BZ反応の金属触媒の価数変化に応じて膨潤・収縮する機能性高分子ゲルをカップリングすることにより、自律的に歩行運動を示す高分子ゲル（BZゲル）が開発されている。申請者は本申請論文の中で、生物の代謝を模倣した新しいロボットの設計指針を提案し、先述のBZゲルを用いて2種類のロボットによってそれを実現した。

6章で述べられたロボットでは、BZゲルの化学反応の基質濃度の変化を利用し、空間の大きさに依存した状況判断能（知覚能）が現れることが示された。また、7章で述べられたロボットでは、BZゲルのコロイドを用いて、分散-凝集を利用した自律的な運動能が現れることを示した。

すなわち申請者は、生物の代謝を最もシンプルにモデル化したシステムから、状況判断能が得られたこと、及び「身体境界」の概念を自律的な集合-分散の平衡によって置き換えても、自律的な運動を実現できることを示した。これらは、システム情報科学の特に複雑系知能科学における「知能の創発」の問題に対して示唆を与え、システム情報科学に寄与した。

したがって審査の結果「合」と判定する。