

ゾウリムシの化学応答モデルを用いた移動ロボットの
バイオミメティック制御*平野 旭^{*1}, 辻 敏夫^{*1}
滝口 昇^{*2}, 大竹 久夫^{*3}Biomimetic Control of Mobile Robots Based on the Chemotactic
Response Model of ParameciumAkira HIRANO^{*4}, Toshio TSUJI,
Noboru TAKIGUCHI and Hisao OHTAKE^{**} Graduate School of Engineering, Hiroshima University,
1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-shi, Hiroshima, 739-8527 Japan

In order to survive in complex natural environments, living organisms have been genetically acquiring various algorithms. Recently, the concept of *Software Biology* has been proposed, in which the algorithms of living organisms are considered as a kind of software that could be utilized for robot control. We have proposed the computer model of *Paramecium*, *Virtual Paramecium*, based on biological knowledge. *Virtual Paramecium* can approximately realize the chemotactic behavior of actual *Paramecium*. In this paper, we report the results obtained when a mobile robot is controlled using *Virtual Paramecium*, and confirm the effectiveness of the biomimetic control based on the information processing algorithm of living organisms.

Key Words: Biomimetic Control, Mobile Robot, Artificial Life, Paramecium, Chemotactic Response

1. はじめに

われわれの身近に存在する原生動物は、機械的な接触刺激の他に、環境の光・温度・化学物質濃度の変化に対して敏感に反応し、生存に有利な環境を選択する。また、ある種の原生動物は、環境の電位勾配に従って陰極側に移動する「負の走電性」と呼ばれる性質を持つ。近年、この「負の走電性」を利用して原生動物の行動を制御し、「生きたマイクロマシン」として利用することを旨とした研究が行われており^{(1)~(3)}、原生動物のなかでも比較的大型で指向性をもって遊泳し、比較的定量的に制御可能なゾウリムシが注目されている。

Itoh は、溶液に印加した電位勾配に対するゾウリムシの応答を計測し、統計的な応答特性に基づいて制御軌道を設計する方法を提案した。そして、提案手法を用いてゾウリムシによる微小物体の搬送に成功した⁽¹⁾。一方 Ogawa らは、高精度かつ詳細な走電性制御を旨とし、電圧を印加してからゾウリムシの頭部が陰極側に向くまでの回転特性モデルや軌道予測モデルを提案している⁽³⁾。しかしながら原生動物の刺激に対する応

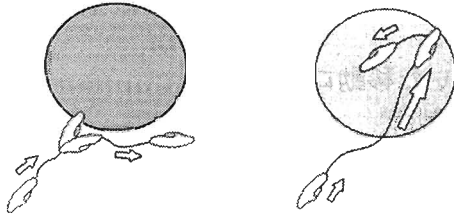
答は、培養された環境や遊泳する環境の各種イオン濃度によって変化するため⁽⁴⁾、統計データに基づいた制御則やモデルが常に有効であるとは限らない。もし、ゾウリムシの化学応答モデルを構築することができれば、環境のイオン組成の影響やそれに伴うゾウリムシの挙動の変化を予測できる可能性がある。さらに、環境の化学物質の濃度を刺激として利用することができれば、走電性制御だけでなく、ゾウリムシの化学応答特性を利用した微小物体搬送といったタスクが実現できる可能性もある。

ゾウリムシは、体長約 250 μm 、幅約 50 μm の楕円体をしており、細胞の表面には一様に繊毛が生えている。環境から刺激を受容すると、数 msec の間に繊毛を打つ方向を変化させ、遊泳方向を変化させる。ゾウリムシは、環境中の種々の陽イオンに反応するが、特に電気生理学的に注目すべきイオンは K^+ と Ca^{2+} である⁽⁴⁾。ゾウリムシは環境の K^+ 濃度の増大を検知すると回避行動を示す(図 1(a))。一方、 K^+ 濃度の減少を検知すると遊泳速度が増大する。 K^+ 濃度が減少した領域をしばらく遊泳し、再びもとの K^+ 濃度の領域を検知すると回避行動が発現するため、 K^+ 濃度の低い領域に留まる(図 1(b))。本研究では、 K^+ 濃度の低い領域に留まるこの応答を集積行動と呼んでいる。これまでに著者らは、環境の K^+ と Ca^{2+} の濃度変化に伴う膜電位変化と挙動を再現するゾウリムシの化学応

* 原稿受付 2006年9月11日。

^{*1} 正員、広島大学大学院工学研究科(☎739-8527 東広島市鏡山14-1)。^{*2} 広島大学大学院先端物質科学研究科。^{*3} 大阪大学大学院工学研究科(☎565-0871 吹田市山田丘2-1)。

E-mail: a_hirano@bsys.hiroshima-u.ac.jp



(a) Avoidance behavior (b) Accumulation behavior

Fig. 1 Reactions for attractant and repellent.

答モデル (バーチャルゾウリムシ) を提案した。そして、環境のイオン濃度の変化に対する回避行動および集積行動が定性的に再現できることを確認した⁽⁵⁾。しかしながら、実際にゾウリムシが生活する実環境は、様々な外乱が予想できないタイミングで発生し、コンピュータシミュレーションのような理想環境の世界とは異なる。そこで本論文では、実環境下におけるバーチャルゾウリムシの環境探索能力の検証を目的とし、モデルを用いて移動ロボットのバイオミメティック制御実験を行う。そして、様々な外乱が存在する実環境において、実生物同様の回避行動および集積行動を実現した結果を報告する。

以下、2ではバーチャルゾウリムシを構成する3つのユニットについて述べる。3では、バーチャルゾウリムシを用いて移動ロボットを制御するシステムを説明し、4ではバイオミメティック制御の結果を示す。

2. バーチャルゾウリムシ

バーチャルゾウリムシは、感覚ユニット、情報処理ユニット、運動決定ユニットの3つのユニットで構成される。感覚ユニットは、環境の化学物質濃度の変化から、ゾウリムシが受容する刺激量を計算するユニットである。情報処理ユニットは、感覚ユニットで計算した刺激量をもとに、ゾウリムシの膜電位変化と繊毛内 Ca^{2+} 濃度を計算するユニットである。運動決定ユニットは、膜電位変化と繊毛内 Ca^{2+} 濃度の変化に基づく繊毛の動きを計算し、それによって決まる個体の運動を算出するユニットである。本章では、各ユニットの詳細について述べる。

2.1 感覚ユニット⁽⁵⁾ 生物の細胞膜には、刺激を受容すると開口し、特定のイオンのみを通過させるイオンチャンネルが存在している。ゾウリムシの場合は、 Ca^{2+} チャンネルと K^+ チャンネルが多く存在している⁽⁴⁾。イオンチャンネル以外にもイオンポンプと呼ばれるイオンの排出機構などが存在し、これらの働きによって細胞内の Ca^{2+} 濃度は環境よりも低く、逆に K^+ 濃度は

高く保たれている。この細胞内外のイオン濃度差により、細胞膜には電位差が発生しており、環境を基準とした細胞内電位は膜電位と呼ばれている⁽⁴⁾。特に、ゾウリムシが刺激を受容していない状態の膜電位は静止膜電位と呼ばれ、環境の Ca^{2+} 濃度 $[\text{Ca}^{2+}]_o$ と K^+ 濃度 $[\text{K}^+]_o$ によってその値が決まる。本ユニットでは、まず、次式を用いて静止膜電位の値を計算する。

$$E_{\text{leak}} = \frac{a_{\text{Ca}} E_{\text{Ca}} + a_{\text{K}} E_{\text{K}}}{a_{\text{Ca}} + a_{\text{K}}} \quad (1)$$

ここで、 a_{Ca} 、 a_{K} は、細胞膜に存在する Ca^{2+} チャンネルと K^+ チャンネルの存在比、 E_{Ca} 、 E_{K} は細胞内外の各種イオン濃度差によって生じる平衡電位である。

環境の K^+ もしくは Ca^{2+} 濃度が変化すると、平衡電位 E_{Ca} 、 E_{K} が変化するため、静止膜電位の値が変化する ((1)式参照)。この時、細胞膜を横切って流れる電流が発生する。本論文では、この電流を検知電流 $I_c(t)$ と定義し、以下の式で計算する。

$$I_c(t) = \frac{1}{R_m} (E_{\text{leak}} - V(t)) \quad (2)$$

ここで、 R_m は細胞膜の入力抵抗、 $V(t)$ は膜電位である。 $I_c(t) < 0$ は電流の流入、 $0 < I_c(t)$ は電流の流出を意味する。化学環境の変化に応じて発生するこの検知電流をゾウリムシが受容する刺激とみなし、計算結果を次の情報処理ユニットに入力する。

2.2 情報処理ユニット⁽⁵⁾ 環境から刺激を受けてイオンチャンネルが開くと、細胞内外のイオン濃度差に基づいてイオンの流入が起り、膜電位はその環境における静止膜電位の値から外れる。このとき、静止膜電位に比べて膜電位が上昇することを脱分極、下降することを過分極という。情報処理ユニットは、この膜電位変化と繊毛内 Ca^{2+} 濃度の変化を計算する。なお、細胞膜には様々な種類のイオンチャンネルが存在するが、本論文では電位感受性イオンチャンネルのみを取り扱う。

まず、繊毛を有するゾウリムシの電気膜特性を次式でモデル化する⁽⁶⁾。

$$\dot{V}(t) = \frac{1}{C_m} [I_c(t) - I_{\text{Ca}}(t, V) - I_{\text{K}}(t, V) - I_{\text{leak}}(t, V)] \quad (3)$$

ここで、 $I_c(t)$ は検知電流、 C_m は細胞膜の膜容量である。 $I_{\text{Ca}}(t, V)$ は Ca^{2+} 電流、 $I_{\text{K}}(t, V)$ は K^+ 電流、 $I_{\text{leak}}(t, V)$ はその他のイオンの流入をまとめたリーク電流であり、それぞれ以下の式で表せる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

$$I_{\text{Ca}}(t, V) = \bar{g}_{\text{Ca}} m^5 \{1 - (1 - h)^5\} (V(t) - E_{\text{Ca}}) \quad (4)$$

$$I_{\text{K}}(t, V) = \bar{g}_{\text{K}} n (V(t) - E_{\text{K}}) \quad (5)$$

$$I_{\text{leak}}(t, V) = \bar{g}_{\text{leak}} (V(t) - E_{\text{leak}}) \quad (6)$$

ここで \bar{g}_{Ca} 、 \bar{g}_{K} 、 \bar{g}_{leak} はそれぞれカルシウム、カリウム、リークイオンチャンネルのイオンコンダクタンスの最大

値, E_{Ca} と E_K は, それぞれカルシウムとカリウムの平衡電位, E_{leak} は静止膜電位, m , h , n はゲート変数と呼ばれるパラメータである. それぞれの指数は文献⁽⁸⁾から決定した. ゲート変数 m , h , n は, Hodgkin and Huxley が神経の膜電位変化を再現するために提案した式⁽⁷⁾を参考に次式で表現する.

$$\dot{m}(t, V, I_c) = \alpha_m(V, I_c) \cdot (1 - m(t, V, I_c)) - \beta_m(V) \cdot m(t, V, I_c) \quad (7)$$

$$\dot{h}(t, V, I_c) = \alpha_h(V, I_c) \cdot (1 - h(t, V, I_c)) - \beta_h(V) \cdot h(t, V, I_c) \quad (8)$$

$$\dot{n}(t, V, I_c) = \alpha_n(V, I_c) \cdot (1 - n(t, V, I_c)) - \beta_n(V) \cdot n(t, V, I_c) \quad (9)$$

m , h , n はイオンチャネルが開口している統計的確率, $1-m$, $1-h$, $1-n$ は閉口している確率を表現したものである. α_x および β_x ($x \in \{m, n, h\}$) は, イオンチャネルが開口および閉口に向かう速度を表した定数である. イオンチャネルが開口する確率は, 環境の静止膜電位レベルによって決まる. しかし, 環境が急激に変化して検知電流の値が大きいほど, 新しい環境の開口確率へ遷移しやすいという傾向を示す⁽⁴⁾. そこで, 検知電流の大きさがイオンチャネルの開口に作用する効果をモデルに導入した. 以上, (3)~(9)式を用いて, ソウリムシの膜電位変化を計算する⁽⁵⁾⁽⁶⁾.

次に, 繊毛を打つ角度 (繊毛打方向) を制御する繊毛内 Ca^{2+} 濃度を計算する. ソウリムシの繊毛には主に Ca^{2+} チャネルのみが存在することから⁽⁴⁾, 繊毛内の他のイオン濃度は変化しないものとする. まず, 繊毛を除去した細胞体みの電気膜特性を次式でモデル化する.

$$\dot{V}(t) = \frac{1}{C_m} [I_c(t) - I_{Ca(\text{cell})}(t, V) - I_K(t, V) - I_{leak}(t, V)] \quad (10)$$

$I_{Ca(\text{cell})}$ はソウリムシの細胞体で生じる Ca^{2+} 電流であり, 次式で表される.

$$I_{Ca(\text{cell})} = \bar{g}_{Ca(\text{cell})} m_{(\text{cell})}^5 \{1 - (1 - h_{(\text{cell})})^5\} (V(t) - E_{Ca}) \quad (11)$$

ここで, $\bar{g}_{Ca(\text{cell})}$ は細胞体における Ca^{2+} チャネルのイオンコンダクタンスの最大値である. $x_{(\text{cell})}(t, V, I_c)$ ($x \in \{m, h\}$) は細胞体に存在する Ca^{2+} チャネルの開閉に関するパラメータであり, 次式で表すことができる.

$$\dot{x}_{(\text{cell})}(t, V, I_c) = \alpha_x(\text{cell})(V, I_c) \cdot (1 - x_{(\text{cell})}(t, V, I_c)) - \beta_x(\text{cell})(V) \cdot x_{(\text{cell})}(t, V, I_c) \quad (12)$$

そして, (4), (11)式で計算した値を用いて, 繊毛で生じる Ca^{2+} 電流 $I_{Ca(\text{cilium})}(t, V)$ を次式により計算する.

$$I_{Ca(\text{cilium})}(t, V) = I_{Ca}(t, V) - I_{Ca(\text{cell})}(t, V) \quad (13)$$

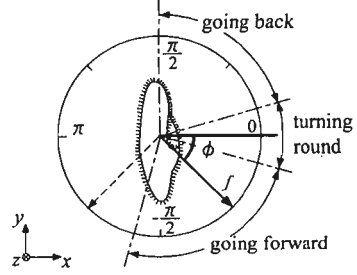


Fig. 2 Ciliary beat direction of *Paramecium*

繊毛内 Ca^{2+} 濃度 $[Ca^{2+}]_{\text{cilium}}$ は, $I_{Ca(\text{cilium})}(t, V)$ の値を用いて, 次式により定式化する⁽⁶⁾.

$$\frac{d[Ca^{2+}]_{\text{cilium}}}{dt} = -\frac{1}{2F} [I_{Ca(\text{cilium})} + (I_p)_{Ca}] \quad (14)$$

$$(I_p)_{Ca} = 2F \frac{(\bar{J}_p)_{Ca}}{1 + \left(\frac{K_m}{[Ca^{2+}]_{\text{cilium}}}\right)^3} \quad (15)$$

ここで, F はファラデー定数 (= 96500 [C/mole]), $(\bar{J}_p)_{Ca}$ は Ca^{2+} の流出量の最大値, K_m は Ca^{2+} の流出量が最大値の半になるときの $[Ca^{2+}]_{\text{cilium}}$ の値である. また, $(I_p)_{Ca}$ は Ca^{2+} を体外に排出する Ca^{2+} ポンプによって生じるポンプ電流であり, 便宜上, (6), (10)式の $I_{leak}(t, V)$ に含まれるものと仮定する. 以上の式を用いて膜電位と繊毛内 Ca^{2+} 濃度の変化を計算し, 運動決定ユニットへの入力とする.

2.3 運動決定ユニット

2.3.1 繊毛打による駆動力の計算 ソウリムシの運動は, 細胞表面に一樣に生えた繊毛の打つ方向 (繊毛打方向) とその強さ (繊毛打頻度) によって決まる. 繊毛打方向とソウリムシの挙動の関係を図2に示す. 通常, ソウリムシの繊毛は $-\pi/4$ [rad] 方向を打ち, 環境の変化に応じて $\pi/2$ [rad] から $-7\pi/12$ [rad] の範囲で変化する. 繊毛打方向が $-\pi/2$ [rad] に近づくと前進力が増して加速し, 逆に $\pi/2$ [rad] 近くを打つと後退する. 本論文では文献⁽⁵⁾⁽⁹⁾を参考に, 繊毛運動とソウリムシの挙動の関係をモデル化する. まず, 繊毛内 Ca^{2+} 濃度に依存した繊毛打方向 ϕ の特性を, 従来研究データ⁽⁴⁾を参考に次式でモデル化する⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾.

$$\phi([Ca^{2+}]_{\text{cilium}}) = \pi \left(\frac{1}{A_\phi \log_{10}([Ca^{2+}]_{\text{cilium}}) - 0.5} - 0.5 \right) \quad (16)$$

$$(A_\phi = A_{\phi 1} \quad ([Ca^{2+}]_{\text{cilium}} < C_\phi))$$

$$(A_\phi = A_{\phi 2} \quad ([Ca^{2+}]_{\text{cilium}} \geq C_\phi))$$

ここで, $A_{\phi 1}$, $A_{\phi 2}$ は定数, C_ϕ は $\phi=0$ [rad] になる繊毛内 Ca^{2+} 濃度である. 本モデルにおける繊毛打方向 ϕ の範囲は, 便宜上 $-\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$ に限定する. 一方,

各角度における繊毛打頻度は、繊毛内部の器官に作用する ATP や AMP の濃度に依存することが示唆されている⁽⁴⁾。しかしながら、現時点ではこのメカニズムの詳細は解明されていないため、本論文では文献 5 を参考に膜電位の関数でモデル化する⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾。

$$f(V) = f_0 + B_1(|B_{\text{leak}} - V(t)|)^{B_2} \quad (17)$$

ここで、 B_1 、 B_2 は定数、 f_0 および B_{leak} は標準塩浴液中における繊毛打頻度と膜電位である。

次に、(16)、(17) 式で算出した値を用いて、繊毛打による駆動力 (図 3(a)) を次式で計算する。

$$F = a_0 f(V) \quad (18)$$

ここで、 a_0 は繊毛打頻度を駆動力に変換するパラメータである。(18) 式で計算した駆動力は、繊毛打の角度 ϕ ($[\text{Ca}^{2+}]_{\text{cilia}}$) を用いて、図 3(a) に示す F_f と F_s に分解することができる。

$$F_f = F \sin \phi([\text{Ca}^{2+}]_{\text{cilia}}) \quad (19)$$

$$F_s = F \cos \phi([\text{Ca}^{2+}]_{\text{cilia}}) \quad (20)$$

ただし、本論文のようにゾウリムシの運動を 2 次元平面で取り扱う場合、細胞の周辺にほぼ一様に分布している繊毛の F_s を x - y 平面に投影して合成すると 0 と近似でき、 F_s は無視することができる (図 3(b) 参照)。

2.3.2 特殊な繊毛打力のモデル化 実生物には、 F_f および F_s 以外に、細胞口 (cytostome) 周辺の特殊な繊毛運動による力 F_d が、細胞の前後軸に対して垂直に発生している (図 3(c))⁽⁹⁾。この影響により、推進力 F_f が大きい通常遊泳時には螺旋状の軌跡を描きながら遊泳し、推進力 F_f が 0 に近くなると細胞後端部付近を支点に回転する (図 3(d))⁽⁴⁾⁽¹¹⁾。この 2 種類の運動は、2 次元平面に投影すると蛇行運動と回転運動に相当する。そこで、本論文では F_d の特徴を次式のように定義することで、蛇行運動と回転運動を再現する。

$$F_d = \begin{cases} \widetilde{F}_d & (|F_f| < F_c) \\ F_d' & (F_c \leq |F_f|) \end{cases} \quad (21)$$

ここで、 \widetilde{F}_d と F_c は正の定数であり、 F_c は回転が発生しない F_f の最小値である。そして、 $F_c \leq |F_f|$ の条件が成り立つ場合、以下の周期で符号を反転させる。

$$F_d' = \begin{cases} -\widetilde{F}_d & (T_f(n-1) \leq t < T_f(n-1/2)) \\ +\widetilde{F}_d & (T_f(n-1/2) \leq t < T_f n) \end{cases} \quad (22)$$

$(n: 1, 2, 3, \dots)$

T_f は実生物における螺旋遊泳の一周期である。 \widetilde{F}_d にかかる符号は、細胞の前後軸に対して F_d が作用する向きを意味している (図 3(c))。一定の大きさの F_d が、細胞の前後軸に対して $T_f/2$ 周期ごとに作用する向きが変わることで蛇行運動を再現する。

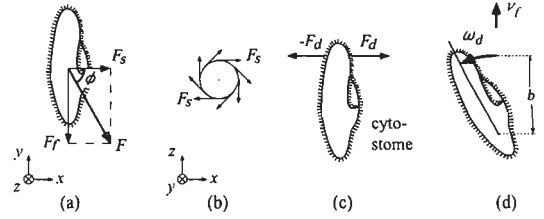


Fig. 3 Locomotion mechanism of *Paramecium*

2.3.3 遊泳速度の計算と蛇行運動モデル

次に、(19)、(21) 式で計算した F_f と F_d の値を用いて、前進遊泳速度 v_f と後端部を支点とする回転角速度 ω_d を計算する。ゾウリムシの場合、レイノルズ係数が 1 以下であるため、速度と力がほぼ比例する。そこで、前進遊泳速度 v_f と回転角速度 ω_d を次式でモデル化する。

$$v_f = -a_1 F_f \quad (23)$$

$$\omega_d = \frac{-a_2 F_d}{b} \quad (24)$$

a_1 、 a_2 は、力を速度に変換するパラメータ、 b は支点と力点間の距離に関するパラメータである。

ゾウリムシの遊泳速度 v_f と回転角速度 ω_d を用いて、2 次元平面の蛇行運動モデルを提案する。まず、運動空間を x - y 平面と定義し、バーチャルゾウリムシの初期状態を $p_0 = [x_0, y_0, \theta_0]^T$ とする。 θ_0 は x 軸に対する細胞前後軸の傾きである。そして、各時刻の位置座標および姿勢を $p_m = [x_m, y_m, \theta]^T$ とする。このとき、 \dot{p}_m は次式であらわすことができる。

$$\dot{p}_m = \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_m + \theta_0) & 0 \\ \sin(\theta_m + \theta_0) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_f \\ \omega_d \end{bmatrix} \quad (25)$$

以上のモデルを用いて、ゾウリムシの 3 次元螺旋運動を 2 次元平面に投影した蛇行運動を再現することができる。次章では、バーチャルゾウリムシを用いて移動ロボットを制御するシステムについて述べる。

3. バイオミメティック制御システム

3.1 システム構成

制御システムの構成を図 4 に示す。本研究では、長さ約 50 mm、幅約 30 mm の小型移動ロボット (TAKARA 製 DQ-0j : j = 1 ~ 4) を制御対象に採用した。この移動ロボットは、赤外線信号を用いて 2 つの後輪モータを独立に制御することが可能である。しかしながら、小型であるためにセンサ類の実装が困難であった。そこで、環境計測には画像処理システム (CV-2000: KEYENCE 製) を用いた。CV-2000 は、35 万画素のモノクロ CCD カメラと、画像処理を行うコントローラで構成されており、プロブ

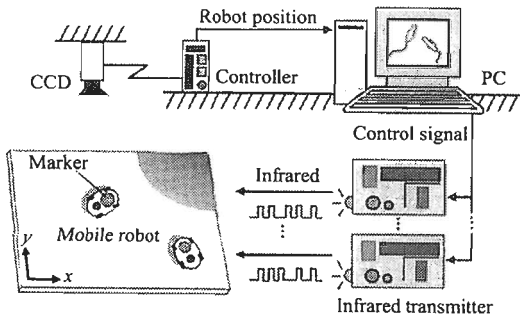


Fig. 4 The multi-robot control system.

モードを用いることで面積が異なる 64 個のマーカの位置座標を同時に計測することができる。本実験では、半径 30 mm 前後の白い円形マーカを移動ロボット上部に取り付けた。

3.2 処理の流れ 移動ロボットの制御実験は、以下の手順で行った。

1. 仮想的な化学環境の設定：

2.5 m × 2.5 m の黒いゴムシート上に座標系を設定し、フィールドの位置座標に仮想的な化学物質濃度を設定する。ゾウリムシは化学濃度の勾配ではなく急激な濃度変化にのみ応答する⁽⁴⁾ため、本実験では濃度勾配を設定しないものとした。また、水の流動現象は考慮しないものとした。

2. 移動ロボットの位置情報の取得：

バーチャルゾウリムシからトリガが印加されると、天井に設置した CCD カメラがフィールドを撮影する。CV-2000 のコントローラ部によって各マーカの重心位置座標が抽出され、バーチャルゾウリムシを搭載したコンピュータに Ethernet を介して送信される。

3. バーチャルゾウリムシによる情報処理：

N 匹のバーチャルゾウリムシは、それぞれの位置座標に対応する化学条件を取得し、情報処理と挙動の決定を行う。

4. 赤外線送信システムによる制御信号の送信：

バーチャルゾウリムシが決定した挙動を移動ロボットで実現するために、RS232C シリアルインターフェースを介してコマンド信号を赤外線送信ユニットに送信する。赤外線送信ユニットは、 N 台の赤外線送信機が並列に接続されたものであり、1 台の送信機が 1 台の移動ロボットを制御する。赤外線送信機は、受信したコマンド信号に基づいて赤外線信号を生成する。

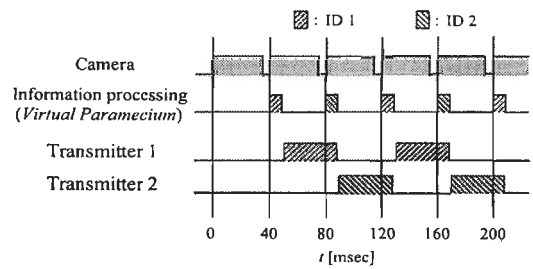


Fig. 5 Timing chart of motor control for two mobile robots.

本システムの仕様では、移動ロボットの座標抽出 (処理 2) には 33 msec, モデルによる情報処理と挙動の決定 (処理 3) には 10 msec, 制御信号の赤外線通信 (処理 4) には 40 msec が必要であった。2 ~ 4 の処理を行うユニットは、それぞれハードウェア的に独立しており、並列して実行することが可能である。従って、複数台のロボットを同時に制御する場合には、1 台の移動ロボットに対する処理 2 ~ 4 をグループ化し、各個体に対する処理を順次繰り返すことで制御を行った。一例として、2 台の移動ロボットを制御した場合のタイムスケジュールを図 5 に示す。

3.3 移動ロボットの運動制御 バーチャルゾウリムシの挙動を 2 輪の移動ロボットで再現する方法について述べる。

まず、次式を用いて左右の車輪の速度を計算する。

$$\begin{bmatrix} v_{mR} \\ v_{mL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2c_r} & -\frac{1}{2c_r} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_f \\ \omega_d \end{bmatrix} \quad (26)$$

ここで、 v_{mR} , v_{mL} は、バーチャルゾウリムシの挙動を 2 輪の移動ロボットで再現するために必要な左右の車輪の速度である。 $2c_r$ は車軸の長さ、 v_f と ω_d は、(23), (24) 式で算出したバーチャルゾウリムシの遊泳速度と回転角速度である。

次に、(26) 式で算出した値を用いて、移動ロボット DQ-0j の左右車輪の速度 (v_{rR} , v_{rL}) を決定する。移動ロボットに採用した DQ-0j は、車軸にエンコーダが付いていないために厳密な速度制御ができないが、左右モータの出力を 31 段階で指定できる。本論文では、トルク不足となるレベル 1 ~ 14, および高速な移動によってすぐに計測領域を外れてしまうレベル 25 ~ 31 を除き、15 ~ 24 の 10 段階を使用することにした。そして、(26) 式で算出した車輪速度を 100 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 刻みで 10 段階に量子化し、レベル 15 ~ 24 に対応させた。なお、バーチャルゾウリムシの負の遊泳速度は、ロボットのモータを逆転させることで再現した。

4. バイオミメティック制御実験

構築したバイオミメティック制御システムを用いて、移動ロボットの制御実験を行った。

4.1 パラメータの設定 まず、バーチャルゾウリムシに含まれる各パラメータを以下のように設定した。

4.1.1 感覚系ユニット 平衡電位を計算するために必要な各イオン濃度は $[K^+]_i = 20.0 \text{ mM}$, $[Ca^{2+}]_i = 10^{-8} \text{ mM}$ 一定とした⁽⁵⁾。(1), (2) 式に含まれるパラメータは、文献⁽⁵⁾を参考に $a_{Ca} = 10$, $a_K = 80$, $R_m = 20 \text{ M}\Omega$ とした。

4.1.2 情報処理ユニット (3) 式に含まれるパラメータは、文献⁽⁹⁾より $C_m = 2 \text{ }\mu\text{F/cm}^2$ とした。(4), (5) 式に含まれる各イオンコンダクタンスは、内藤による実測値⁽⁶⁾に基づいて $\bar{g}_{Ca} = 0.6667 \text{ mS/cm}^2$, $\bar{g}_K = 1.3333 \text{ mS/cm}^2$ とした。

イオンチャネルの開放および閉鎖に関する速度定数 α_x および β_x ($x \in \{m, n, h\}$) に含まれるパラメータは、文献⁽⁵⁾に基づいて以下のように決定した。

$$\alpha_m(V, I_c) = \frac{0.0224(V + 32.5814)}{1 - \exp\left[-\frac{V + 32.5814}{0.5998}\right]} + b_{Ca}I_c \quad (27)$$

$$\beta_m(V) = 0.3034 \exp\left[-\frac{V + 60.0084}{39.9452}\right] \quad (28)$$

$$\alpha_h(V, I_c) = 2.0009 \exp\left[-\frac{V + 65.9911}{9.0569}\right] + b_{Ca}I_c \quad (29)$$

$$\beta_h(V) = \frac{0.8704}{1 + \exp\left[-\frac{V + 0.7888}{23.4592}\right]} \quad (30)$$

$$\alpha_n(V, I_c) = \frac{0.0375(V - 28.5884)}{1 - \exp\left[-\frac{V - 28.5884}{8.1682}\right]} + b_K I_c \quad (31)$$

$$\beta_n(V) = 0.0524 \exp\left[-\frac{V - 15.0009}{68.0880}\right] \quad (32)$$

ただし、検知電流が小さい場合はチャネルの開口に関与せず、また、流れる向きが細胞内から外向きの場合には Ca^{2+} チャネルが開口しやすく、内向きに流れる場合には K^+ チャネルが開口しやすい傾向にある⁽⁴⁾。そこで、(27) ~ (32) 式に含まれる b_{Ca} と b_K は以下のように設定した。

$$b_{Ca} = \begin{cases} 0.05 & (0 < Th_1 \leq I_c) \\ 0 & (I_c < Th_1) \end{cases}$$

$$b_K = \begin{cases} 0 & (Th_2 < I_c) \\ -0.09 & (I_c \leq Th_2 < 0) \end{cases}$$

ここで Th_1 と Th_2 は閾値であり、それぞれ $Th_1 = 0.25 \text{ nA}$, $Th_2 = -5 \text{ nA}$ とした。

リークコンダクタンス g_{leak} , 細胞体の Ca^{2+} コンダクタンス $\bar{g}_{Ca(\text{cell})}$, Ca^{2+} ポンプに関するパラメータ $(\bar{J}_p)_{Ca}$ と K_m は、次のように決定した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

$$g_{leak} = 0.42 \text{ mS/cm}^2, \quad \bar{g}_{Ca(\text{cell})} = 0.5333 \text{ mV},$$

$$(\bar{J}_p)_{Ca} = 3.1750 \times 10^{-2}, \quad K_m = 0.04$$

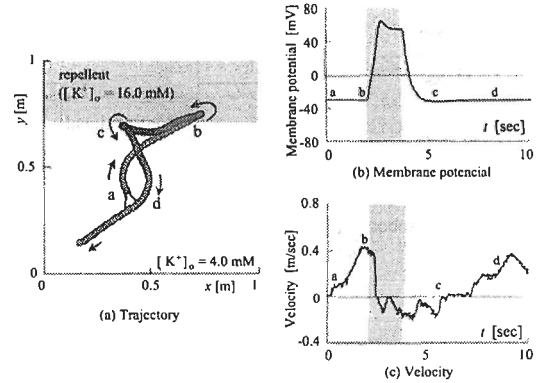


Fig. 6 Reaction to the area of $[K^+]_0 = 16.0 \text{ mM}$.

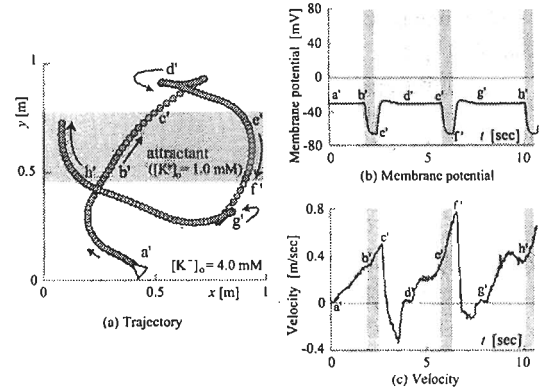


Fig. 7 Reaction to the area of $[K^+]_0 = 1.0 \text{ mM}$.

4.1.3 運動決定ユニット 繊毛打方向 ϕ や推進力 $f(V)$ に関するパラメータは、ゾウリムシの運動を記録したビデオや文献⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽¹²⁾を参考に、以下のように決定した。

$$A_{\phi 1} = 1.2, \quad A_{\phi 2} = 4.0, \quad C_{\phi} = 3 \text{ }\mu\text{M},$$

$$B_1 = 0.08, \quad B_2 = 2.0, \quad f_0 = 15$$

また、(18) ~ (24) 式に含まれるパラメータは、以下のように設定した。

$$a_0 = 100 \text{ m/Ns}, \quad a_1 = 0.3333 \text{ m/Ns}, \quad a_2 = 0.02 \text{ m/Ns},$$

$$b = 200 \text{ }\mu\text{m}, \quad F_d = 5 \text{ }\mu\text{N}$$

4.2 静的な化学環境を想定した探索実験 次に、構築したバイオミメティック制御システムとバーチャルゾウリムシを用いて、静的な環境条件に対する探索実験を行った。本実験では、標準塩溶液環境 ($[K^+]_0 = 4 \text{ mM}$) に1台の移動ロボットを置き、 K^+ 濃度が異なる刺激領域に対する応答を確認した。その結果を図6, 図7に示す。

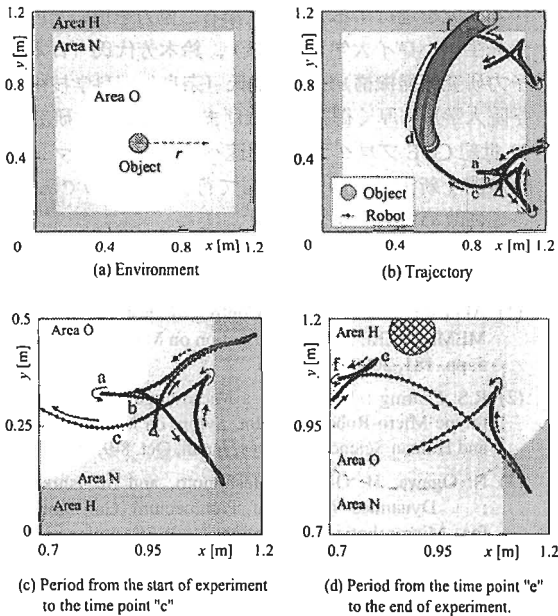


Fig. 8 Reaction for an object with a chemical field

図 6 は, $[K^+]_0 = 16 \text{ mM}$ の領域 (忌避領域) に対する応答結果である。図中の円が 0.04 sec 毎の移動ロボットの位置座標である。また、図 6(c) における負の速度は後退を表している。時刻 b で移動ロボットが忌避領域を感知し、脱分極による急停止後、後退しているのが確認できる。その後、方向転換によって忌避領域を回避し、標準塩溶液環境の探索を再開していることがわかる (時刻 c, d)。

一方、 $[K^+]_0 = 1 \text{ mM}$ の領域 (誘引領域) に対する応答結果を図 7 に示す。図 7 において移動ロボットは、時刻 b' で環境 K^+ 濃度の低下を感知することで過分極し、加速している。その後、時刻 c' で領域を出たことを感知し、減速、後退を行うことで誘引領域に戻ろうとしている。この時、誘引領域への集積は失敗しているが、時刻 e' で再び誘引領域に進入していることが確認できる。以上、バーチャルゾウリムシを用いたバイオミメティック制御により、実生物に近い探索行動が実現できていることがわかる。

しかしながら、図 6(a)、図 7(a) の軌跡より、2.3 で提案した運動モデルによる蛇行運動を確認することができない。これは、タイヤの滑りや前輪の摩擦、モータの応答特性などが原因し、理想的な動作が行えていないためである。しかし、提案した蛇行運動モデルが、直線的な挙動よりも移動ロボットの姿勢を変化させやすいことが図 6(a)、図 7(a) からわかる。この効果は、忌避領域を感知した際の後退において、移動ロボット

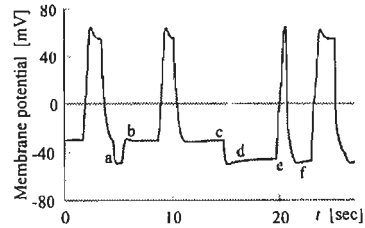


Fig. 9 Membrane potential of the *Virtual Paramecium*

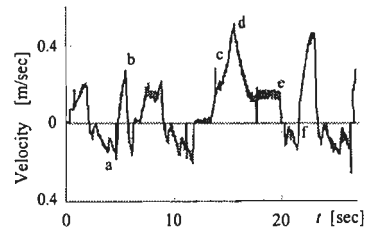


Fig. 10 Velocity of the mobile robot

の進行方向を確率的に忌避領域から遠ざける点で有効であった。これより、ゾウリムシの螺旋運動は、理想的な動作が行えない自然環境で確率的に進行方向を変化させる 1 つの重要なメカニズムであると考えられる。

4.3 モデルの化学応答特性を利用したタスクの実現最後に、本稿で構築したバイオミメティック制御システムによるタスクの実現可能性を確認した。タスクは、特定領域からの物体除去とした。

実験環境を図 8(a) に示す。半径 50 mm、質量約 10 g の円柱形の物体 (Object) をフィールドに配置し、ゾウリムシのエサである細菌群に見立てた。細菌群の周辺は、放出する酸によって近傍領域とは化学環境が異なる。ゾウリムシはその違いを手がかりに細菌群の場所を探しあてると考えられている⁽¹³⁾。そこで、 $[K^+]_0 = 16 \text{ mM}$ の領域を Area H, $[K^+]_0 = 4 \text{ mM}$ の領域を Area N と設定し、物体周辺 ($r = 0.38 \text{ m}$) の Area O は、物体が存在する領域の K^+ 濃度よりも 0.25 倍低くなるものとした。実験は 30 sec 間行い、障害物とロボットの動きを明確にするために制御対象は 1 台とした。

0.04 sec ごとの移動ロボットおよび物体の位置座標を図 8 (b) 示す。また、実験開始から時刻 c までの軌跡の拡大図を図 8 (c)、時刻 e から実験終了までの拡大図を図 8 (d) に示す。なお、図 8 (d) における破線は Area H と他の領域の境界線、2 点鎖線は Area O と他の領域の境界線である。バーチャルゾウリムシの膜電位変化は図 9、移動ロボットの速度は図 10 に示す。

スタート直後、移動ロボットは K^+ 濃度が高いArea Hを感知して、約3 sec間後退した。そして、後退中に、 K^+ 濃度が1 mM (4.0 mM \times 0.25)のArea Oに進入したため、時刻aで加速した。加速の効果によってすぐにArea Oを外れてしまったが、図10の時刻bにおける減速より、Area Oに留まろうとしている様子が確認できる。その後、Area Hに対する回避行動を数回繰り返して、時刻cには再度Area Oに進入した(図8(c))。このとき、Area Oの K^+ 濃度は1 mMであるため、移動ロボットは時刻a同様に加速した。時刻dではロボットが物体に接触したため、抗力によって速度が低下していることが図10からわかる。図9および図10で影を付けた時間帯は、移動ロボットが物体に接触後、物体を一定速度で押し続けた時間帯である。時刻eでは、物体の重心がArea Hに進入したため、Area Oの K^+ 濃度が1 mMから4 mM (16.0 mM \times 0.25)に増加した。バーチャルゾウリムシは、この変化を検出して移動ロボットに回避行動を出力した。その結果、Area Hに物体を置いてArea Nの探索を再開した。実験開始からの一連の動作により、Area Nに配置してあった物体をArea Hへ搬送することに成功した。

以上の結果より、搬送物体の周辺をゾウリムシが集積しやすい化学条件にできれば、物体周辺への滞在確率を高め、物体を搬送しやすくなることが確認できた。今後、環境の化学物質濃度を刺激として利用できるかどうかについて、さらに検討する予定である。

5. ま と め

本論文では、バーチャルゾウリムシを用いて小型移動ロボットのバイオミメティック制御実験を行った。その結果、コンピュータシミュレーション同様に、忌避領域に対する回避行動および誘引領域への集積行動を確認した。また、バーチャルゾウリムシの化学応答特性を利用した物体搬送実験を行った。

今後は、特に運動決定ユニットを詳細にモデル化していくことを目指す。本論文では、定説とされてきた内藤らの知見に基づき、螺旋遊泳の原因として特殊な繊毛打を導入した。しかし、そのメカニズムは厳密には解明されておらず、大綱らによって解明が試みられている⁽¹⁴⁾。新たな知見が得られ次第、モデルに修正を加えていく予定である。また、繊毛運動による推進力の発生メカニズムの詳細なモデル化や化学物質の濃度勾配や水の流動現象を考慮したシミュレーションを行い、より実生物に近いモデルを構築していく予定である。

本研究を遂行する上で多大なるご協力を頂いた内藤豊先生(ハワイ大学客員教授)、鈴木芳代氏(日本原子力研究開発機構)、植良諭氏(奈良先端科学技術大学院大学)に厚く御礼申し上げます。なお、本研究は21世紀COEプログラム「超速ハイパーヒューマン技術が開く新世界」の一環として行われたものであり、ここに改めて謝意を表します。

文 献

- (1) Akitoshi Itoh : "Motion Control of Protozoa for BioMEMS", IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Vol. 5, pp. 181, 2000.
- (2) R.S. Fearing : "Control of a Micro-Organism as a Prototype Micro-Robot", 2nd Int. Symp. on Micromachines and Human Sciences, Nagoya, Japan, Oct. 8-9, 1991.
- (3) N. Ogawa, H. Oku, K. Hashimoto, and M. Ishikawa : "Dynamics Model of Paramecium Galvanotaxis for Microrobotic Application," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, Apr. 19, 2005.
- (4) Y. Naitoh : "Behavior of Unicellular Animals," University of Tokyo Press, 1990.
- (5) A. Hirano, T. Tsuji, N. Takiguchi, and H. Ohtake : "Simulation for Chemotactic Response of *Paramecium* using *Virtual Paramecium*," Trans. of SICE, Vol. 42, No. 11, pp.1252-1259, 2006.
- (6) A. Hirano, T. Tsuji, N. Takiguchi, and H. Ohtake : "Modeling of the Membrane Potential Change of *Paramecium* for Mechanical Stimuli," Trans. of SICE, Vol. 41, No. 4, pp.351-357, 2005.
- (7) A.L. Hodgkin and A.F. Huxley : "A Quantitative Description of Current and Its Application to Conduction and Excitation in Nerve," The Journal of Physiology, Vol. 117, pp. 500-544, 1952.
- (8) Y. Naitoh and K. Sugino : "Ciliary Movement and Its Control in *Paramecium*," *J. Protozool.*, Vol. 31, pp. 31-40, 1984.
- (9) Y. Naitoh : "New Physiological Science Outline 1 Physiology of Excitable Membrane (Watanabe, Yamagishi edition)," Igaku-Shoin, pp. 242-257, 1986.
- (10) A. Hirano, T. Tsuji, N. Takiguchi, and H. Ohtake : "Biomimetic Control of mobile robots based on the Information Processing Model of *Paramecium*," Proceedings of the Eleventh International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp. 313-318, 2006.
- (11) K. Sugino and Y. Naitoh : "The Measure Approach of Swimming Trajectory in *Paramecium*," *Igaku-Shoin*, Vol.39, No.5, pp. 485-490, 1988.
- (12) Y. Naitoh and R. Eckert : "A Regenerative Calcium Response in *Paramecium*," *J. Exp. Biol.*, Vol.56, pp. 667-681, 1972.
- (13) Y. Hotta : "*Paramecium*," Science and Technology Film/Video Festival, 2000.
- (14) T. Harada and K. Oami : "Analysis of swimming behavior in *Paramecium*," *Tsukuba Journal of Biology*, Vol.2, No.2, 2004.