

# マイクロロボット応用のための微生物の軌道計画

## Trajectory Planning of Motile Cell for Microrobotic Application

正 尾川 順子 (東大) 正 奥 寛雅 (東大)  
正 橋本 浩一 (東北大) 正 石川 正俊 (東大)

Naoko OGAWA, University of Tokyo, Naoko.Ogawa@ipc.i.u-tokyo.ac.jp

Hiromasa OKU, University of Tokyo

Koichi HASHIMOTO, Tohoku University

Masatoshi ISHIKAWA, University of Tokyo

Our purpose is to utilize microorganisms as micro-robots by using galvanotaxis (locomotor response to electrical stimulus). In this paper, trajectory planning of a Paramecium cell is discussed. In galvanotactic navigation, a Paramecium cell is regarded as a nonholonomic system like a two-wheeled vehicle, but the system disallows switchback or pivoting. We propose a novel method for cusp-free trajectory planning by using Lyapunov method.

**Key Words:** Paramecium, Micromachine, Galvanotaxis, Trajectory Planning, Lyapunov-like Control

### 1. まえがき

近年、マイクロメートルオーダーの微細な世界の計測・制御に対する要求が高まりつつあり、操作者の作業を支援し負担を軽減する自動化技術の導入が望まれている。しかし現存するマイクロマシン技術はセンサ搭載や電源供給・配線が困難などの問題から、非自律的・受動的な単独機能の実現にとどまっている。一方、微生物はその進化の過程で高性能なセンサとアクチュエータを体内に獲得してきた。もし微生物の生理機構にはたらきかけてその特性を制御できれば、既存のシステムを超える様々な機能が実現できる可能性がある。我々はこの観点から、微生物個体を高機能マイクロマシンとみなして制御することを目指している [1]。

微生物のマイクロマシン応用において、ナビゲーション技術の確立は最重要課題であり、非侵襲、非接触な運動制御技術として電気走性(電気刺激に対する定位反応)の利用が有用である。例えば原生生物の一種であるゾウリムシは、電場印加に対して陰極方向に泳ぐという性質をもつため、電場の大きさや向きを調整することでゾウリムシの運動が制御できることになる。これまでゾウリムシに対し、電気走性を利用したごく単純な運動制御が行われているが [1-4]、これらは経験則に基づいた制御のため、制御性能に限界があった。これに対し、ゾウリムシをロボティクスの枠組から議論することで、より高度な制御が可能になると考えられる。そのためにはゾウリムシの物理的なダイナミクスを把握し、数学的に表現することが必要である。そこで、著者らはゾウリムシの電気走性のダイナミクスモデルを構築し、実際のゾウリムシの行動と比較してその振舞いが定性的に妥当であること、陰極への遊泳やUターン行動などが再現されることを確認した [5]。またこのモデルを簡略化することにより、ゾウリムシが二輪車によく似た非ホロノミック拘束系であること、大域的に可制御であることを示した [6]。この結果により、ロボティクス分野において確立された既存の非ホロノミック系の軌道計画手法がゾウリムシに適用できる可能性がひらかれた。

非ホロノミックな構造は、二輪車、四輪車、ロボットアーム、宇宙機などさまざまな機構に存在し、それぞれに対して多様

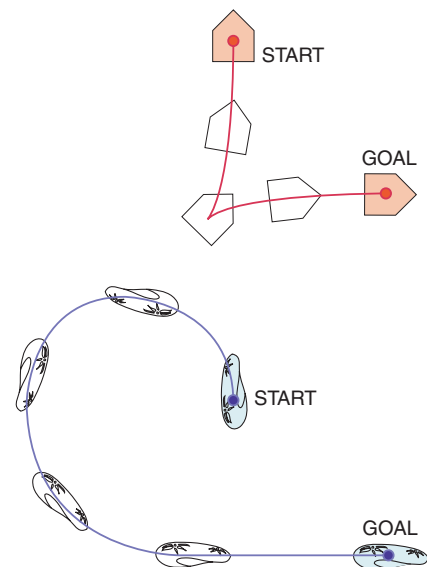


Fig. 1 上: 二輪車や水中推進体の軌道計画。下: ゾウリムシの軌道計画

な軌道計画手法や運動制御手法が提案されてきた [7-9]。そのなかでも特に、船舶や潜水艇など、水中推進体 (underwater vehicle, UV) と呼ばれる機構は、水中を前進や回転によって進むという点でゾウリムシの遊泳と大きく共通する。これまでも、水中推進体の非ホロノミック制御に関する多くの研究がなされてきた [10-12]。しかし、これらの研究における水中推進体は、後退運動ができるという点でゾウリムシと大きく異なっていた (図 1)。ゾウリムシは、例えば障害物にぶつかったときなど繊毛逆転により一時的に後退運動をすることはできるが、これは一過性のものであり、外部電気刺激によって恒常的に後退運動を引き起こすことは現時点では非常に困難な道と思われる。さらに、ゾウリムシの場合は運動方程式にある項が加わるため、厳密には二輪車と異なるシステムであり、既存の軌道計画の適用を難しくしている。

そこで本稿では非ホロノミック系に Lyapunov ライクな手法を用いて [13, 14]、切り返し等による cusp (尖点) をなくした

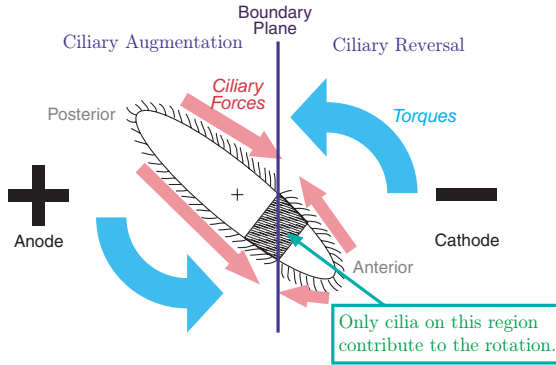


Fig. 2 Ludloff 現象によるゾウリムシ電気走性の定性的説明

cuspid-free な軌道計画および運動制御手法を提案する。

## 2. ゾウリムシ電気走性のダイナミクスモデル

ゾウリムシ (*Paramecium caudatum*) は体長  $200 \sim 250 \mu\text{m}$  ほどの楕円体形の単細胞生物である [15]。体表面に無数に生えている繊毛を繰り返し動かす(繊毛打)ことで水を後方に押し、その反作用で遊泳する。この繊毛運動は、細胞の膜電位の変化とそれに伴うイオン濃度変化によって制御される。もし細胞外部に電場をかけると、膜電位の変動により繊毛運動が変化し、運動に影響が生じる。具体的には陰極に向かって泳ぐようになる。これを負の電気走性という。

電場の中におかれたゾウリムシを観察すると、特徴的な繊毛反応がみられる。図2のように、電場方向に垂直な平面をやや陰極よりに置いてゾウリムシを二分したと考えると、陽極側の繊毛は激しく打ち出し(繊毛打強化)、陰極側の繊毛は逆向きに激しく打ち出す(繊毛打逆転)。これは Ludloff 現象と呼ばれ、これによってゾウリムシの負の電気走性は定性的に説明される [16]。すなわち、図2の網掛け部分における繊毛打方向の非対称性により生じる回転力が、ゾウリムシを陰極に向かわせることとなる(その他の部分の繊毛運動は左右対称であるため、回転には寄与しない)。

著者らはゾウリムシをロボティクスの枠組から扱う最低限の準備として、ゾウリムシ電気走性を記述するダイナミクスモデルと運動方程式をボトムアップ的に構築し [5]、簡略化した [6]。本節ではこれを天下り的に導入する。詳細は文献 [5, 6] を参照されたい。

図3のように、座標系の位置  $(X, Y)$  にゾウリムシがあり、体軸が  $X$  軸となす角度が  $\eta$  であるとする。いま、ここに電場刺激を印加することを考える。電場の強さを  $E$ 、向きを  $\gamma$  とする。ゾウリムシにとっての電場の相対的な向きは  $\psi = \eta - \gamma$  となる。

ゾウリムシを楕円体として近似し、電気走性にとって本質的でない螺旋運動を考えないことにすると、ゾウリムシの運動は2次元  $XY$  平面内で記述できる。ゾウリムシの簡略化された運動方程式は次式で与えられる [5]。

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \frac{aE}{D} \cos \eta \\ \dot{Y} &= \frac{aE}{D} \sin \eta \\ \dot{\eta} &= \frac{bE}{D'} (\eta - \gamma) + \dot{\gamma} \end{aligned} \quad (1)$$

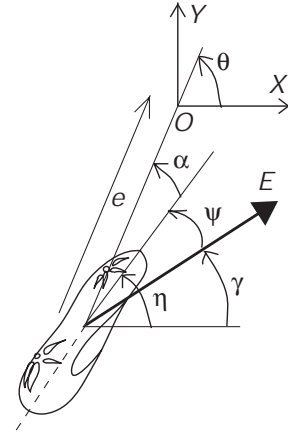


Fig. 3 座標系と各変数の定義

ここで、 $D, D'$  はそれぞれ並進運動、回転運動の粘性係数、 $a, b$  は比例係数である。

## 3. 座標変換

前節で導入されたゾウリムシ系(式(1))はデカルト座標系を基盤とした triplet  $(X, Y, \eta)$  で記述されている。これを、以下のような極座標系を基盤とした  $(e, \theta, \alpha)$  であらわすことを考える(図3)。

$$\begin{aligned} e &= \sqrt{X^2 + Y^2} \\ \theta &= \text{atan2}(-Y, -X) \\ \alpha &= \theta - \eta \end{aligned} \quad (2)$$

すなわち、 $e$  は動径、 $\theta$  は角度、 $\alpha$  は体軸の動径からの角度方向のずれを示す。デカルト座標系における速度ベクトル  $(\dot{X}, \dot{Y})$  と極座標系の速度ベクトル  $(\dot{e}, \dot{\theta})$  との関係は次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} \dot{e} \\ e\dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{pmatrix}$$

これにより次式を得る。

$$\begin{aligned} \dot{e} &= -\dot{X} \cos \theta - \dot{Y} \sin \theta = -\frac{aE}{D} \cos \alpha \\ \dot{\theta} &= \frac{1}{e} (\dot{X} \sin \theta - \dot{Y} \cos \theta) = \frac{aE}{De} \sin \alpha \\ \dot{\alpha} &= \dot{\theta} - \dot{\eta} = \frac{aE}{De} \sin \alpha - \frac{bE}{D'} (\theta - \alpha - \gamma) - \dot{\gamma} \end{aligned}$$

すなわち、系の状態方程式は  $(e, \theta, \alpha)$  空間では以下のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{e} &= -u \cos \alpha \\ \dot{\theta} &= \frac{u \sin \alpha}{e} \\ \dot{\alpha} &= \frac{u \sin \alpha}{e} - q u (\theta - \alpha - \gamma) - \dot{\gamma} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $u = aE/D, q = Db/(D'a)$  である。この状態方程式は、集合  $\Xi = \{e, \theta, \alpha : e = 0 \forall (\theta, \alpha) \in \mathbb{R}^2\}$  を除いた全域で定義される。

#### 4. 制御則

今、制御タスクの目的は  $(e, \alpha, \theta) \rightarrow (0, 0, 0)$  とする．これは  $(X, Y, \eta) \rightarrow (0, 0, 0)$  と同等である．また参照座標系を適当にとれば、任意の位置姿勢を目標とするタスクは、適切な座標変換によってこのタスクと同値にできる．このとき軌道計画は、任意の初期状態に対してこの目的が漸近的に達成されるような滑らかな時間関数  $u$  と  $\dot{\gamma}$  を求める問題となる．以下では、Lyapunov 法に類似した方法で、制御則を導く．

まず、ゾウリムシが前進しかできないという点を考慮し、 $u$  に対する制御則を以下のように定める．

$$u = \xi e \quad : \quad \xi > 0 \quad (4)$$

これにより、式 (3) は

$$\begin{aligned} \dot{e} &= -\xi e \cos \alpha \\ \dot{\alpha} &= \xi \sin \alpha - \xi q e (\theta - \alpha - \gamma) - \dot{\gamma} \\ \dot{\theta} &= \xi \sin \alpha \end{aligned} \quad (5)$$

となる．式からわかるように、 $\cos \alpha > 0$ 、すなわちゾウリムシの前方に目標地点がある場合には、 $e$  が小さくなる方向、すなわち目標地点に近づく方向にゾウリムシが運動する．逆に、 $\cos \alpha < 0$ 、すなわちゾウリムシの後方に目標地点がある場合には、 $e$  が大きくなる方向、すなわち目標地点からいったん遠ざかる方向にゾウリムシが運動する．いっぽう、詳細は後述するが  $\alpha$  は単調減少する．これにより、初期姿勢においてゾウリムシの後方に目標があっても U ターン行動が行われ、いずれはゾウリムシの前方に目標地点が位置するようになり、ゾウリムシは目標に近付いて行く．

次に、Lyapunov 2 次関数を

$$V := \frac{1}{2}(\alpha^2 + h\theta^2), \quad h > 0 \quad (6)$$

とおく．この導関数は、

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \alpha \dot{\alpha} + h\theta \dot{\theta} \\ &= \xi \alpha \sin \alpha - \xi q e \alpha \theta + \xi q e \alpha^2 + \xi q e \alpha \gamma - \alpha \dot{\gamma} + h\theta \xi \sin \alpha \end{aligned}$$

となる．ここで  $\dot{\gamma}$  を以下のように選ぶ．

$$\dot{\gamma} = \xi \sin \alpha - \xi q e \theta + \xi q e \alpha + \xi q e \gamma + h\theta \xi \frac{\sin \alpha}{\alpha} + k\xi \alpha \quad (7)$$

このとき

$$\dot{V} = -k\xi \alpha^2 \leq 0 \quad (8)$$

となる．

式 (8) より  $V$  は非負の有限な極限に近付き、 $\alpha$  と  $\theta$  はそれぞれ有限の極限  $\bar{\alpha}$ 、 $\bar{\theta}$  をもつ．よって、 $V$  は  $t \rightarrow \infty$  にしたがって有限極限  $\frac{1}{2}(\bar{\alpha}^2 + h\bar{\theta}^2)$  に近づく．また、 $\dot{V} = -2\alpha \dot{\alpha} k\xi$  が有界なことから、 $\dot{V}$  は一様連続である．ゆえに、Barbalat の補題を用いて  $\dot{V}$  が 0 に近づくことが示され、同時に  $\bar{\alpha} = 0$  となる．

制御則 (7) を式 (5) に代入すると、

$$\begin{aligned} \dot{e} &= -\xi e \cos \alpha \\ \dot{\alpha} &= -h\theta \xi \frac{\sin \alpha}{\alpha} - k\xi \alpha \\ \dot{\theta} &= \xi \sin \alpha \end{aligned} \quad (9)$$

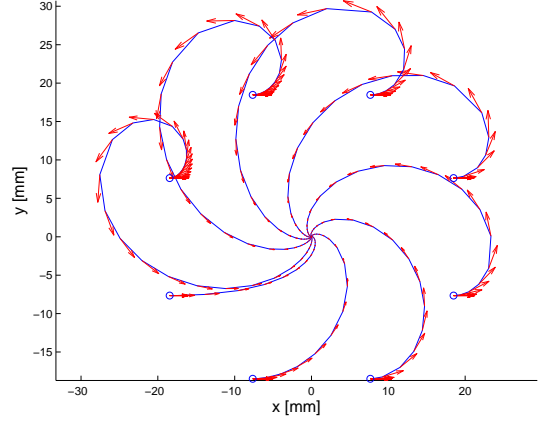


Fig. 4 提案する制御則によって作られた軌跡

となる．

$\alpha \rightarrow 0$ 、 $\theta \rightarrow \bar{\theta}$ 、 $\dot{\alpha}$  が一様に連続であるという事実から、再度 Barbalat の補題を用いれば、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\alpha} = -\xi h \bar{\theta} = 0 \quad (10)$$

となり、 $\bar{\theta} = 0$  であることがわかる．これらにより、 $\alpha$ 、 $\dot{\alpha}$ 、 $\theta$ 、 $\dot{\theta}$  はいずれも 0 に収束する．さらに、式 (5) より、 $\dot{e} \rightarrow -\xi e$  となるので、 $e \rightarrow 0$  となる．

まとめると、正パラメータ  $\xi$ 、 $h$ 、 $k$  を用いてゾウリムシ制御則

$$\begin{aligned} u &= \xi e \\ \dot{\gamma} &= \xi \sin \alpha - \xi q e \theta + \xi q e \alpha + \xi q e \gamma + h\theta \xi \frac{\sin \alpha}{\alpha} + k\xi \alpha \end{aligned}$$

が得られたことになる．この制御則において電場の強さ  $E = Du/a$  と向きの変化分  $\dot{\gamma}$  という 2 つの物理パラメータを調整することにより、 $(e, \theta, \alpha) \rightarrow (0, 0, 0)$  が達成される．

#### 5. 数値実験

この軌道計画を数値実験によって検討した．数値実験には MathWorks 社の MATLAB を使用した．

タスクとして、さまざまな姿勢から目標地点 (原点) へ向かうタスクを設定した．初期位置は原点から 20mm の点とし、相対姿勢は  $45^\circ$  ごとの 8 種類を用意した．絶対姿勢としては、ゾウリムシは常に X 軸方向を向いている．

パラメータの値は、試行錯誤により  $\xi = 1$ 、 $k = 0.5$ 、 $h = 0.1$  とした．その他のパラメータは、これまでの数値実験と同一とした [5]．

生成された軌跡を図 4 に示す．図の赤い矢印は、各地点での電場刺激入力の大ささと向きを正規化して表したものである．ゾウリムシが切り返し等を伴うことなく前進と回転だけを使って最終地点に近付いていることがわかる．また、 $X$  変位、 $Y$  変位、角度  $\eta$  の時間経過を図 5~7 に示す．時間経過に従って収束していることがわかる．

#### 6. まとめ

本稿では、構築したモデルをもとにゾウリムシが後退できないという点を考慮した軌道計画手法を提案し、任意の地点

から目標地点に向かって安定に軌道が収束することを数値実験により検証した。

## 文 献

- [1] N. Ogawa, H. Oku, K. Hashimoto and M. Ishikawa. Microrobotic visual control of motile cells using high-speed tracking system. *IEEE Trans. Robotics*, **21**(4), 704–712, Aug. 2005.
- [2] A. Itoh. Motion control of protozoa for bio MEMS. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, **5**(2), 181–188, June 2000.
- [3] 山根淳, 尾川順子, 奥寛雅, 橋本浩一, 石川正俊. ゾウリムシの運動制御のための電流制御型電気刺激デバイス. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2004 (ROBOMECH '04) 講演論文集, 1A1–H–28, Jun. 2004.
- [4] K. Takahashi, N. Ogawa, H. Oku and K. Hashimoto. Organized motion control of a lot of microorganisms using visual feedback. *Proc. 2006 IEEE Int. Conf. Robotics & Automation (ICRA2006)*, May 2006. (to appear).
- [5] N. Ogawa, H. Oku, K. Hashimoto and M. Ishikawa. Dynamics model of Paramecium galvanotaxis for microrobotic application. *Proc. 2005 IEEE Int. Conf. Robotics & Automation (ICRA 2005)*, 1258–1263, Apr. 2005.
- [6] 尾川順子, 奥寛雅, 橋本浩一, 石川正俊. 電気走性アクチュエーションにおけるゾウリムシの非ホロノミック性. 第 23 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, p. 3F14, Sept. 2005.
- [7] 美多勉. 非線形制御入門—劣駆動ロボットの技能制御論—. 昭晃堂, 2000.
- [8] 中村仁彦. 非ホロノミックロボットシステム—第 1 回非ホロノミックなロボットって何? 日本ロボット学会誌, **11**(4), 521–528, Apr. 1993.
- [9] 中村仁彦. 非ホロノミックロボットシステム—第 2 回幾何学的な非ホロノミック拘束の下での運動計画. 日本ロボット学会誌, **11**(5), 655–662, May 1993.
- [10] 池田貴幸, 南澤権, 美多勉. 浮遊機械のノンホロノミック可変拘束制御の提案と収束性の検討. 日本ロボット学会誌, **18**(6), 847–855, 2000.
- [11] R. M. Murray and S. S. Sastry. Nonholonomic motion planning: Steering using sinusoids. *IEEE Trans. Automatic Control*, **28**(5), 700–716, May 1993.
- [12] M. Aicardi, G. Casalino and G. Indiveri. On a closed loop time invariant position control solution for an underactuated 3D underwater vehicle: implementation, stability and robustness considerations. *Proc. Underwater Technology 2000 (UT'00)*, May 2000.
- [13] G. Indiveri. Kinematic time-invariant control of a 2D nonholonomic vehicle. *Proc. 38th IEEE Conf. Decision and Control (CDC'99)*, **3**, 2112–2117, Dec 1999.
- [14] 浦久保孝光, 土屋和雄, 辻田勝吉. あるクラスの非ホロノミックシステムに対するリャプノフ制御. 計測自動制御学会論文集, **37**(11), 1020–1025, Nov. 2001.
- [15] 内藤豊. 単細胞動物の行動—その制御のしくみ—. UP バイオロジー 85. 東京大学出版会, Dec. 1990.
- [16] K. Ludloff. Untersuchungen über den Galvanotropismus. *Archiv für die Gesamte Physiologie*, **59**, 525–554, 1895.

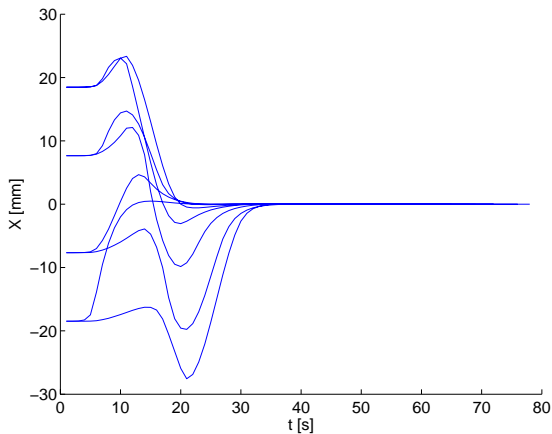


Fig. 5 X 変位の時間経過

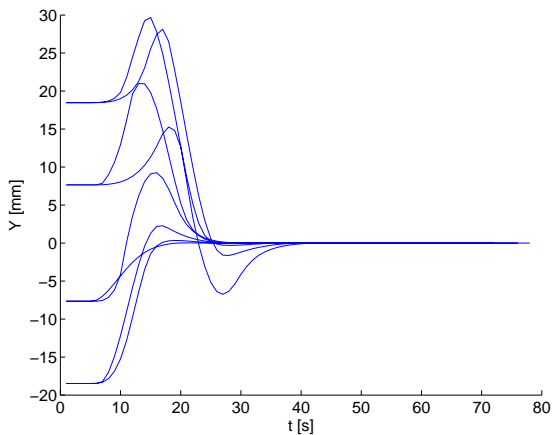


Fig. 6 Y 変位の時間経過

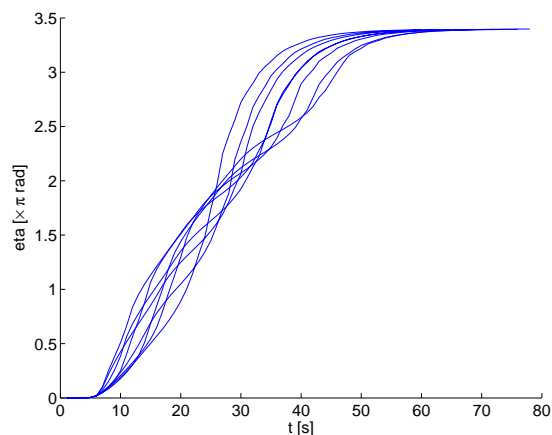


Fig. 7 角度  $\eta$  の時間経過