螺旋型べん毛で運動する細菌を模したマイクロロボットの概念*

後藤 知伸^{*1}, 伊藤 誠^{*2}, 高野 泰齊^{*1}

A Concept of Miro-Robot Imitating Bacteria with Helical Flagella

Tomonobu GOTO, Makoto ITOU and Yasunari TAKANO

A concept of a micro-robot is proposed. The robot is assumed to possess a spherical body and rotating helical screws as bacteria do. Formulations are conducted for describing the motion of the robot applying the resistive force theory of Stokes flow. The motions of the robot with two screws are numerically analyzed as an example. An on-off type control for rotation of the one screw is employed. When the two screws rotate in the same direction (mode 1), the robot swims almost straight. The body of the robot rotates in the opposite direction of screw rotation. When one of the screws is at a standstill and the other keeps rotation (mode 2), the robot moves along a helix. Alternating these two modes, the robot changes the direction of the motion. It is shown that the robot which can detect the distance from a destination can approach it according to a simple rule.

Key Words: Moving Robot, Micromachine, Modelling, Bio-Motion, Swimming Bacterium, Helical Flagellum, Resistive Force Theory

1. 緒 言

運動する細菌(バクテリア)は、 $1 \sim 2\mu\text{m}$ 程度の菌体とその10倍程度の長さの一本あるいは数本の螺旋形のべん毛をもつ。べん毛はその根元にあるべん毛モータによって約 $100 \sim 1000\text{rps}$ で回転し、べん毛が周りの流体から受ける抵抗力によって、細菌はべん毛を伝播する螺旋波形と反対の方向に直線的に泳ぐ。遊泳速度は約 $10 \sim 100\mu\text{m/s}$ であり、この間、菌体はべん毛と反対方向にゆっくり回転する⁽¹⁾。

このような細菌の運動は、実在する生物の運動のメカニズムを理解しようという立場^{(2)~(5)}や、回転運動する分子機械という大きな特徴をもつべん毛モータの機構を解明しようという立場⁽⁶⁾から関心を集めており、その寸法の小ささからマイクロマシンなどへの応用が期待できる。著者らは、抵抗力理論⁽⁷⁾、境界要素法⁽⁸⁾などを適用して、任意形状のべん毛⁽⁷⁾、べん毛の回転軸が球形の菌体の中心から外れる場合⁽⁹⁾、回転楕円体の菌体⁽¹⁰⁾、複数のべん毛を有する細菌形状⁽¹¹⁾に対して、

このような細菌の遊泳運動の解析を進めてきた。

ところで、細菌はこうした直線的な運動に停止・方向転換(タンブル)を交え⁽¹²⁾、頻繁に進行方向を変えることによって、誘因物質の周りに集まり、忌避物質から逃れる性質を持っている⁽¹⁾。サルモネラ菌のように複数のべん毛をもつ細菌の場合、直線運動では、べん毛モータを菌体から見て時計回りの方向に回転させ、べん毛は一本の束として回転する。一方、タンブル状態では、モータを逆回転させて束ねたべん毛を一旦解き、その場で菌体をランダムな方向に回転させる。この二つの状態の繰り返しにより、細菌はジグザグに泳ぐ⁽¹²⁾。

ここでは、螺旋型べん毛を回転させて運動する細菌を模した、直線運動と方向転換によって目標の位置に到達するマイクロロボットの概念について述べる。ただし、それは実在する細菌のように複数のべん毛を束ねて回転させるのではなく、二本の螺旋型スクリューを別々に回転させることにより、水中を運動するものである。一本のスクリューを常に回転した状態にしておき、残りの一本の回転と停止を適当に制御することにより、ロボットがほぼ希望する場所に到達できることを示す。

* 原稿受付 1997年10月20日。

^{*1} 正員, 鳥取大学工学部(☎680-8552 鳥取市湖山町南4-101)。^{*2} 学生員, 鳥取大学大学院。

Fig.1 Schematic of a micro-robot imitating bacteria.

2. 細菌型マイクロロボットの運動解析

2.1 細菌型マイクロロボット 図1に示すように、マイクロロボットの本体は球形であり、水中で運動するために同一形状の二本の左巻き螺旋型スクリューを備えているものとする。スクリューはその根元にあるモータによって回転し、モータの回転軸は球形の本体の中心を通るように配置されている。モータは回転または停止の状態をとるものとし、回転の状態では一定角速度で本体から見て時計回りに回転する。

水中微生物の運動にともなう流体の運動は低レイノルズ数、すなわち粘性力が支配的で慣性力が無視できるために、微生物に働く力や運動速度を決定することは、定常ストークス流の問題に帰着する。ここでは、細菌型マイクロロボットの運動の解析を、球に対するストークスの抵抗法則や細長物体理論から得られる抵抗係数を利用する抵抗力理論を用いて行う。

2.2 力の釣り合い式 静止座標系 $O-x_1x_2x_3$ (x -座標系) の他に、図2に示すような球形の本体の中心を原点 O_0 とする本体に固定された $O_0-\eta_1\eta_2\eta_3$ 座標系 (η -座標系) を考える。すなわち、二本のスクリューの回転軸によって張られる平面に η_1, η_2 軸が含まれ、とくに η_1 軸が二本のスクリューの回転軸の二等分線に一致するように座標系を決める。また、モータの位置を原点 O_k とする各スクリューに固定された $O_k-\xi_{k1}\xi_{k2}\xi_{k3}$ 座標系 (ξ_k -座標系) を考える。ここで、 k は各スクリューの番号を示し、 $k=1, 2$ である。モータの回転軸は、 ξ_{k1} 軸と一致している。

慣性力が無視できるので、自走するマイクロロボットでは、スクリューを含むロボット全体に作用する力と力のモーメントの和が零となる。

$$\sum_{k=1}^2 \mathbf{F}_k + \mathbf{F}_b = 0 \quad (1)$$

Fig.2 Definitions of coordinates and velocities. (a) η -coordinate and ξ_k -coordinate, (b) Velocity vector and angular velocity vectors.

$$\sum_{k=1}^2 (\mathbf{M}_k + \mathbf{r}_k \times \mathbf{F}_k) + \mathbf{M}_b = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{F}_b, \mathbf{F}_k$ は本体およびスクリューに作用する力を、 $\mathbf{M}_b, \mathbf{M}_k$ は力のモーメントを示す。また、 $\mathbf{r}_k = \overrightarrow{O_0O_k}$ であり、式(2)は η -座標系の原点 O_0 に関するものである。

2.3 本体に働く力と力のモーメント 半径 r_b の球形の本体が粘性係数 μ の静止流体中を速度ベクトル $\mathbf{U}_0$ 、角速度ベクトル $\boldsymbol{\Omega}_0$ で運動するとき、その球に作用する力と力のモーメントは、ストークスの抵抗則より与えられる⁽¹³⁾。

$$\mathbf{F}_b = -6\pi\mu r_b \mathbf{U}_0 \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_b = -8\pi\mu r_b^3 \boldsymbol{\Omega}_0 \quad (4)$$

2.4 スクリューに働く力と力のモーメント ξ_k -座標系において、スクリューの形状が、位置ベクトル $\mathbf{y}_k(s)$ によって表される場合に、スクリューに作用する力と力のモーメントを抵抗力理論によって評価する。ここで、 s は原点 O_k からスクリューに沿う長さである。

位置 $\mathbf{y}_k(s)$ にあるスクリューの微小要素の速度 $\mathbf{u}_k(s)$ は、原点 O_k における速度ベクトル $\mathbf{U}_k$ と角速度ベクトル $\boldsymbol{\Omega}_k$ およびモータの角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_k$ を用いて、次式のように表される。

$$\mathbf{u}_k(s) = \mathbf{U}_k + (\boldsymbol{\Omega}_k + \boldsymbol{\omega}_k) \times \mathbf{y}_k(s) \quad (5)$$

抵抗力理論では、静止流体中を運動する細長い物体に作用する抵抗力を、物体に沿う接線成分と垂直な法線成分に分けて、抵抗係数を用いて評価する。螺旋型スクリューの長さ ds の微小部分に作用する力の接線成分および法線成分は、位置 $\mathbf{y}_k(s)$ における螺旋曲線の接線ベクトル、主法線ベクトルおよび従法線ベクトル $\mathbf{t}_k(s), \mathbf{n}_k(s), \mathbf{b}_k(s)$ を用いて、それぞれ次のように表される。

$$d\mathbf{F}_{kT} = -K_T(\mathbf{u}_k(s) \cdot \mathbf{t}_k(s))\mathbf{t}_k(s)ds \quad (6)$$

$$d\mathbf{F}_{kN} = -K_N \{(\mathbf{u}_k(s) \cdot \mathbf{n}_k(s))\mathbf{n}_k(s) + (\mathbf{u}_k(s) \cdot \mathbf{b}_k(s))\mathbf{b}_k(s)\} ds \quad (7)$$

K_T , K_N はそれぞれ、接線抵抗係数、法線抵抗係数であり、ここでは、以下に示す Lighthill⁽²⁾ の抵抗係数を採用している。

$$K_T = \frac{2\pi\mu}{\ln(0.36\lambda_f/d)} \\ K_N = \frac{4\pi\mu}{\ln(0.36\lambda_f/d) + 0.5} \quad (8)$$

ここで、 λ_f , d は、それぞれ、スクリューの螺旋一巻きの長さとしてスクリューの線径である。

式(6)および式(7)を s について、スクリューの長さ全体に渡って積分すると、次のようにまとめられる。

$$\mathbf{F}_k^{\xi_k} = \int (d\mathbf{F}_{kT}^{\xi_k} + d\mathbf{F}_{kN}^{\xi_k}) \\ = A\mathbf{U}_k^{\xi_k} + B(\boldsymbol{\Omega}_k^{\xi_k} + \boldsymbol{\omega}_k^{\xi_k}) \quad (9)$$

$$\mathbf{M}_k^{\xi_k} = \int \mathbf{y}_k^{\xi_k} \times (d\mathbf{F}_{kT}^{\xi_k} + d\mathbf{F}_{kN}^{\xi_k}) \\ = C\mathbf{U}_k^{\xi_k} + D(\boldsymbol{\Omega}_k^{\xi_k} + \boldsymbol{\omega}_k^{\xi_k}) \quad (10)$$

式(9),(10)の関係は各スクリューに固定されている ξ_k -座標系の直交基底に対して成り立つことを示すために上添字 ξ_k を付けて示している。また、 A, B, C, D は3行3列の定数行列^{(7),(9)}である。二本のスクリューに同一形状を仮定するので、これらの行列は、どちらのスクリューでも同じものになる。なお、モータは ξ_k -座標系の ξ_{k1} 軸を回転軸とするので、 $\boldsymbol{\omega}_k^{\xi_k} = (\omega_{k1}^{\xi_k}, 0, 0)^T$ となる。

2.5 座標系の関係とロボットの速度・角速度 座標系の直交基底の関係から、任意のベクトル $\mathbf{a}$ のそれぞれの座標系における成分は、時間関数の行列 $T_k(t)$ を用いて次式のように表される。

$$\mathbf{a}^{\xi_k} = T_k(t)\mathbf{a}^\eta \quad (11)$$

上添字はベクトルがどの座標系の基底を用いて表されているかを示す。図2に示すように、 ξ_k -座標系の ξ_{k1} 軸は、 η_1 - η_2 平面にあり、 η_1 軸から角度 θ_k をなしているので、変換行列 $T_k(t)$ は、

$$T_k(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_k(t) & \sin \phi_k(t) \\ 0 & -\sin \phi_k(t) & \cos \phi_k(t) \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} \cos \theta_k & -\sin \theta_k & 0 \\ \sin \theta_k & \cos \theta_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

となる。ここで、

$$\phi_k(t) = \int_0^t \omega_{k1}^{\xi_k} dt + \phi_k(0) \quad (13)$$

である。式(11)を用いると、式(9),(10)は η -座標系において次のように表される。

$$\mathbf{F}_k^\eta = T_k^{-1} A T_k \mathbf{U}_k^\eta + T_k^{-1} B T_k \boldsymbol{\Omega}_k^\eta + T_k^{-1} B \boldsymbol{\omega}_k^{\xi_k} \quad (14)$$

$$\mathbf{M}_k^\eta = T_k^{-1} C T_k \mathbf{U}_k^\eta + T_k^{-1} D T_k \boldsymbol{\Omega}_k^\eta + T_k^{-1} D \boldsymbol{\omega}_k^{\xi_k} \quad (15)$$

ロボット本体は剛体であると仮定しているため、点 O_0 と点 O_k の速度の間には次のような関係が成立する。

$$\mathbf{U}_k = \mathbf{U}_0 - \mathbf{r}_k \times \boldsymbol{\Omega}_0, \quad \boldsymbol{\Omega}_k = \boldsymbol{\Omega}_0 \quad (16)$$

また、 η -座標系において $\mathbf{r}_k \times \boldsymbol{\Omega}_0 = R_k \boldsymbol{\Omega}_0^\eta$ となるように、 η -座標系の基底による $\mathbf{r}_k$ の成分を用いて、行列 R_k を次のように定義する。

$$R_k = \begin{bmatrix} 0 & -r_{k3}^\eta & r_{k2}^\eta \\ r_{k3}^\eta & 0 & -r_{k1}^\eta \\ -r_{k2}^\eta & r_{k1}^\eta & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式(16)および式(17)を考慮して、式(1),(2)に式(3),(4)と式(14),(15)を代入すると、力と力のモーメントの釣り合い式は、

$$\left[\sum_{k=1}^2 T_k^{-1} A T_k - 6\pi\mu r_b I \right] \mathbf{U}_0^\eta \\ + \left[\sum_{k=1}^2 (T_k^{-1} B T_k + T_k^{-1} A T_k R_k) \right] \boldsymbol{\Omega}_0^\eta \\ = - \sum_{k=1}^2 T_k^{-1} B \boldsymbol{\omega}_k^{\xi_k} \quad (18)$$

$$\left[\sum_{k=1}^2 (T_k^{-1} C T_k + R_k T_k^{-1} A T_k) \right] \mathbf{U}_0^\eta \\ + \left[\sum_{k=1}^2 (T_k^{-1} D T_k - T_k^{-1} C T_k R_k) \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^2 (R_k T_k^{-1} B T_k - R_k T_k^{-1} A T_k R_k) - 8\pi\mu r_b I \right] \boldsymbol{\Omega}_0^\eta \\ = - \sum_{k=1}^2 (T_k^{-1} D + R_k T_k^{-1} B) \boldsymbol{\omega}_k^{\xi_k} \quad (19)$$

となる。ここで、 I は 3×3 の単位行列である。

モータの回転速度 $\omega_{k1}^{\xi_k}(t)$ を時間の関数として与えると、式(12),(13)を用いて $T_k(t)$ が求められ、式(18),(19)よりロボットの速度ベクトル $\mathbf{U}_0^\eta$ および角速度ベクトル $\boldsymbol{\Omega}_0^\eta$ が求められる。こうして得られた $\mathbf{U}_0^\eta$, $\boldsymbol{\Omega}_0^\eta$ を用いて、ロボットの軌跡および η -座標系の基底ベクトルの運動をそれぞれ求めることができる。

2.6 理論の成立条件 本解析ではストークス流中の球や細長物体に対して得られる抵抗係数を利用して抵抗力学を展開しており、その適用範囲はストークス近似が成り立つような状態に限られる。ストーク

Fig.3 Swimming modes of a micro-robot. (a) Mode 1, (b) Mode 2.

ス近似は、以下に示すレイノルズ数が1以下の範囲で実験値とよく一致する⁽¹⁴⁾。

$$Re = \frac{2r_b U_0}{\nu} \leq 1 \quad (20)$$

ここで、 ν は流体の動粘性係数である。水の値 $\nu = 1.0 \text{ mm}^2/\text{s}$ (20°C)⁽¹⁴⁾を代入すると、

$$r_b U_0 \leq 0.5 \text{ mm}^2/\text{s} \quad (21)$$

となる。スクリューに対しても、スクリューの線径 d およびスクリューの螺旋の半径 r_s と回転角速度 ω から得られる特性速度 $r_s \omega$ を用いて、式(21)に対応する次の条件が考えられる。

$$dr_s \omega \leq 1.0 \text{ mm}^2/\text{s} \quad (22)$$

スクリューの線径 d は概ね本体の直径の $1/10$ 以下であるので、式(22)は式(21)に比べて厳しい条件ではなく、モータの回転角速度 ω の上限を決める目安になる。

細菌の場合にはレイノルズ数が非常に小さく ($Re = 10^{-5} \sim 10^{-4}$)、ストークス近似が成立する。本体の直径が 1 mm 程度のマイクロロボットの場合、速度 1 mm/s 程度で水中を移動するとき $Re \sim 1.0$ となり、本解析は妥当な結果を与えることができる。この寸法のロボットを現時点で製作することは困難だと考えられるが、その前段階の製作可能な寸法のロボットとして、グリセリン ($\nu = 1183 \text{ mm}^2/\text{s}$ (20°C))⁽¹⁴⁾中を移動する本体の直径 60 mm 程度のロボットを考えると、移動速度 15 mm/s のとき $Re \sim 0.76$ となる。

なお、今回の解析では重力の効果を考慮していないが、スクリューの回転による重心位置の移動は小さいと考えられるので、浮力を差し引いた重力による沈降速度が式(21)を満足する場合には、力の釣り合い式(18),(19)に η -座標系で表した重力の影響を組み入れることができる。

Fig.4 Trajectory of the micro-robot moving in mode 1. (a) Bird's view, (b) Cross-sectional view; the numbers indicate the count of screw-motor rotation.

3. 結果と議論

図1に示したような細菌型マイクロロボットに対し、スクリューモータの回転をオンオフ制御することにより、目的の場所に移動できることを、2章の解析結果を用いた数値シミュレーションにより示す。

3.1 マイクロロボットの運動モード 螺旋型スクリューの巻き数3、螺旋の半径 $r_s = r_b/5$ (ただし、この螺旋半径は根元の方では小さくなっており、本体と滑らかに繋がっている)、螺旋の傾斜角 45° 、二本のスクリューのなす角度 90° に設定した。二本のスクリューの回転方向と回転数は一定で、一本のスクリュー ($k=1$) は常に回転し続け、もう一本のスクリュー ($k=2$) は回転または停止のどちらかの状態をとるものとする。以下では図3に示すように、両方のスクリューが回転している場合をモード1、スクリュー ($k=2$) が停止している状態をモード2とする。

モード1では、ロボットの本体は細かい螺旋軌跡を描きながら、ほぼ直線的に前進する。このときの本体中心の軌跡の詳細を、進行方向に対し垂直な座標を拡

Fig.5 Trajectory of the micro-robot moving in mode 2. (a) Bird's-eye view, (b) Close-up of the part A in Fig.5(a).

大して図 4(a) に示す。本体は最初原点に位置しており、 η -座標系の η_1 軸、 η_2 軸がそれぞれ z 軸の負の方向および y 軸の正の方向にはば向くような姿勢になっている。軌跡はスクリーモータの 1 回転毎に楕円を描く。図 4(b) には、モータが n 回転目のときの軌跡を x - y 平面に投影して示す。楕円の軸が徐々に回転しており、この回転はロボットの本体の回転に対応している。その回転数は、モータの回転数の約 $1/263$ であり、回転方向はスクリーによって発生する力のモーメントを打ち消す方向である。マイクロロボットが直進する際に本体をスクリーと逆方向にゆっくりと回転させて移動するというこの性質は、運動する細菌がもつ基本的性質であり、本ロボットを細菌の行動の研究のモデルとして利用するときには有用になるものと考えられる。

モード 2 では、停止しているスクリーに足を捕られるように、ロボットの本体が歳差運動をするので、ロボットは螺旋形に運動する。図 5 に軌跡の詳細を示す。図 5(a) に見られる大きい螺旋が本体の回転に、図 5(b) に見られる小さい螺旋がスクリーの回転に対応している。図 5 における原点でのロボットの姿勢は、図 4 と

Fig.6 Turn of the micro-robot alternating mode 1 and mode 2. (a) Bird's-eye view, (b) Cross-sectional view; y - z plane, (c) Cross-sectional view; x - z plane.

同じであり、モード 1 とは別の方向に進んでいくことがわかる。そこで、モード 1 とモード 2 を組み合わせた場合のロボットの運動を次に調べる。

3.2 モードの切り替えによる方向転換 モード 1 で直進した後、モード 2 で方向転換し、再びモード 1 で直進する場合の軌跡を図 6 に示す。各モードの継続時間はモータ 100 回転分である。このようにモードの切り替えによって、ロボットは方向転換することができる。

モード 2 の継続時間と進行方向の振れ角 Θ およびモード 2 に入る直前のロボットの基準面から見た次の進行方向のねじれ角 Φ 、

$$\Theta = \cos^{-1}[\eta_1(0) \cdot \eta_1(\infty)] \quad (23)$$

$$\Phi = \cos^{-1}[\eta_2(0) \cdot \eta_1(\infty) / \sin \Theta] \quad (24)$$

の関係を図 7 に示す。 Φ は、方向転換した後に直進する方向を示すベクトル $\eta_1(\infty)$ を方向転換する前の η_2 - η_3 平面に投影したベクトルと η_2 -軸とのなす角である。 Θ 、 Φ はモード 2 での大きい螺旋軌跡に対応して、モータ 210 回転分の周期をもつ。また、モード 2 の継続時間がモータ 105 回転分の時間のとき、 Θ は約 130° でありロボットは最も大きく曲がることができる。

Fig.7 Relation between the direction after a turn and the period of mode 2.

Fig.8 Trajectory of the micro-robot approaching to a destination; the destination is at (500,500,500). (a) Bird's-eye view, (b) Cross-sectional view; y-z plane, (c) Cross-sectional view; x-z plane.

3.3 ロボットの運動速度 式(18),(19)が示すように、ロボットの運動速度はモータの回転速度と比例関係にある。そこで、代表長さとして本体の半径 r_b を

用い、無次元運動速度を $2\pi V/(\omega_1 r_b)$ と定義する。ただし、 V はスクリューの回転に起因する細かな螺旋運動を無視した場合の運動の速さ、すなわち、モード1では直進運動、モード2では螺旋運動の速さである。モード1、モード2の無次元運動速度は、それぞれ0.122および0.107であり、モータ1回転あたり本体直径の1/20程進むことがわかる。

なお、実在の細菌の運動速度の例として、単毛性細菌であるビブリオ菌の運動速度とべん毛回転数の同時計測結果から、 $2\pi V/\omega_1 \approx 0.113\mu\text{m}$ という値が得られている⁽⁶⁾。この細菌の菌体は俵型（長径 $\approx 1.92\mu\text{m}$ 、短径 $\approx 0.80\mu\text{m}$ ）であり、表面積の等しい球の半径を代表長さとする、無次元運動速度は0.182となる。ロボットと実在の細菌では形状が異なり、両者の値をそのまま比較することはできないが、無次元運動速度の値は概ね一致している。

3.4 目的地への接近 マイクロロボットが目的地に近づいているか遠ざかっているかを検知することができる場合、誘因物質に集まる細菌のように、モード2による方向転換を交えてランダムに運動することにより、目的地に近づくことができるものと考えられる。そこで、次のような行動規範を設定する。

(1) モード1において、モータの100回転毎に目的地までの距離を検知し、前回検知した距離と比較する。

(2) 目的地に近づいていれば、そのままモード1を続け直進する。

(3) 遠ざかっているときには、方向転換する。すなわち、モード2を105回転分継続し、その後0～263回転分のランダムな継続時間モード1で運動する。

(4) 方向転換(3)が終了したら、通常モード1に戻る。

この規範に従うロボットの軌跡の一例を図8に示す。ロボットはジグザグに進みながら目的地の近くまで移動することがわかる。このロボットには運動を停止する機能がないので、目的地に近づいた後にはその周辺をうろつく。このような細菌型マイクロロボットの運動解析の結果と実在の細菌運動の観察結果を比較すれば、細菌の知能や学習の研究に役立つものと考えられる。

4. 結 言

本研究では、螺旋型べん毛を回転させて推進する細菌を模したマイクロロボットとして、球形の本体に二本の螺旋型スクリューを有する形状を提案し、スクリューの回転を時間的に変化させる場合のマイクロロボットの運動を解析するための定式化を行った。

二本のスクリューを同時に同方向に回転させると、ロボットは本体をゆっくりとスクリューと逆方向に回転させて直進する。これは、運動する細菌がもつ基本的性質である。また、一方のスクリューを停止するとロボットは方向転換する。この際のスクリューの停止時間と方向の振れ角およびねじれ角の関係を求めた。

ロボットが目的地に近づいているか遠ざかっているかを区別できる場合には、誘因物質に集まる細菌のように、方向転換を交えて運動することにより、目的地の近くまで移動できることを示した。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金(基盤B研究 09450077、奨励研究 09750194)を用いて行なわれた。ここに記して感謝の意を表す。

文 献

- (1) 神谷, 細菌の運動と行動, 生体科学の基礎 4 生体運動 2, 日本生物物理学会編, 学会出版センター (1982), 15-45.
- (2) Lighthill, J., Flagellar hydrodynamics, *SIAM Review*, 18 (1976), 161-230.
- (3) Keller, J. B. & Rubinow, S. I., Swimming of flagellated microorganisms, *Biophysical J.*, 16 (1976), 151-170.
- (4) Higdon, J. J. L., A hydrodynamic analysis of flagellar propulsion, *J. Fluid Mech.*, 90 (1979), 685-711.
- (5) Phan-Thien, N., Tran-Cong, T. & Ramia, M., A boundary-element analysis of flagellar propulsion, *J. Fluid Mech.*, 184 (1987), 533-549.
- (6) Magariyama, Y., et al., Simultaneous Measurement of Bacterial Flagellar Rotation Rate and Swimming Speed, *Biophysical J.*, 69 (1995), 2154-2162.
- (7) 高野, 後藤, 臼井, 単毛性細菌の推進機構の解析, 機論, 62, B (1996), 211-217.
- (8) 後藤, 多賀, 高野, 境界要素法によるべん毛の抵抗力理論の検討, 機論, 63, B (1997), 188-193.
- (9) 後藤, 伊藤, 高野, べん毛による細菌運動の解析, 機論, 63, B (1997), 410-416.
- (10) Goto, T., Itou, M. & Takano, Y., An Application of the Resistive Force Theory to Helical Flagellar Motions, *Proc. on JSME International Conference in Fluid Engineering, Tokyo*, (1997), 1819-1824.
- (11) Goto, T., Itou, M. & Takano, Y., Helical Trajectories of Flagellated Bacteria, *Proc. on JSME International Conference on New Frontiers in Biomechanical Engineering, Tokyo*, (1997), 251-254.
- (12) Macnab, R. M. & Ornston, M. K., Normal-to-Curly Flagellar Transitions and Their Role in Bacterial Tumbling. Stabilization of an Alternative Quaternary Structure by Mechanical Force, *J. Mol. Biol.*, 112 (1977), 1-30.
- (13) 今井, 流体力学 (前編), 裳華房 (1973), 322-332
- (14) 巽, 流体力学, 培風館 (1982), 300-304, 416.