

螺旋回転推進を行う三次元索状能動体の研究

高山俊男* 広瀬茂男*

Study on 3D Active Cord Mechanism with Helical Rotational Motion

Toshio Takayama* and Shigeo Hirose*

Active Cord Mechanism is a mechanism in which the joints are coupled in many numbers in series, just like a snake. Typical studies of the propulsion of the Active Cord Mechanism focus on the 2D winding movement, like a snake. But Active Cord Mechanism may generate very efficient locomotion by introducing 3D motion. This paper proposes a new kind of propulsion principle for the underwater Active Cord Mechanism, in which each articulated body segment creates distortion motion, while keeping the whole body in a helical shape. The helical body will revolve around the center axis of the helices due to the forces generated by the distortion motion, and progress along the center axis of the helices. This paper also discusses about the design and control of a new mechanical prototype to realize a hermetic underwater 3D Active Cord Mechanism. Finally the effectiveness of the proposed principle for the underwater Active Cord Mechanism is evaluated by experiments using the developed robot.

Key Words: Active Cord Mechanism, Swimming, Hermetic Joint, Spirochete, Helical

1. 目 的

生物は、従来型の人間が造ってきたマシンでは行われたことのなかったような、高い機能性を有する運動を行うことがある。そのため、こうした生物の動作の基本原理解を理解しそれを工学的に利用していくことは、新しいロボット開発に多くの示唆を与えるものであると考えられる。我々は多様な生物の中でも、ヘビに代表される細長い体幹を有した生物に興味を持ち、主としてヘビの地上推進運動を中心にしてこれまで持続的な研究を続けてきた [1]。このようなヘビの運動は、その単純なひも状の形態の運動制御によって凹凸のある不整地を対地適応的に移動したり、ギャップを乗り越えるときには体幹をブリッジとして機能させたり、さらに必要があればその体幹を対象物に巻き付けて指として機能させたりと多様な動作を生成する。つまり多様な動作を単純なひも状の体幹によって実現しているという点で工学的にも興味深いからである。そして、筆者らはヘビ形の能動関節を多数直列に連結した機能体を「索状能動体 (Active Cord Mechanism)」と名付け、多くの種類の索状能動体試作モデルを試作しながらその有用性を実験的にも検証してきた [2] [3]。

さて、ヘビに代表されるこのような細長い能動体幹を有する生物は、地上において蛇行推進するだけでなく、海ヘビやウナギの遊泳運動のように水中においても巧みな推進運動を行う。そしてその遊泳運動においては、推力を体幹の屈曲運動のみで生

成する。船舶などでは船体から無限回転するロッドを外部に出してスクリューを回転させなければならないため、その回転部分に防水シールが必要である。しかし、屈曲運動のみで推進できるヘビ型の遊泳機構の場合にはこのようなシール機構が不要である。このような特性を考えると、索状能動体は水陸両用移動体としても有効に利用できると考えられる。

海ヘビに代表される水中での索状能動体の遊泳運動はこのような興味深い特性を有しているが、筆者らはこれまでヘビ型的水中遊泳メカニズムについてはまったく検討していなかった。しかし世界的には、流体力学の分野の研究者によりヘビやウナギなどの水中遊泳運動に関する先駆的研究はすでに行われている。また、蛇行遊泳を行うヘビ型ロボットの試作もすでに行われ、遊泳実験の結果が報告されている [4]~[6]。そのため、地上と地中においてはふく推進運動を行う水陸両用型索状能動体の設計法に関する基本的な知見は、すでにある程度解明できている状況であると考えられる。

しかし、ヘビ型的水中遊泳運動は、海ヘビやウナギなどが行うふく推進形態が唯一のものではない。顕微鏡下で観察される微生物の世界では、もう一つのかかなり特異な遊泳形態が観察されることが報告されている。それは、スピロヘータ等が行う回転型の遊泳体型である。スピロヘータの回転型遊泳とは、スピロヘータが進行する方向を中心軸としたとき、スピロヘータの体幹をその中心軸の周囲にコイルスプリングのように螺旋形状を成し、その螺旋形状の体幹を中心軸周りに回転させながら遊泳するものである。

このようなスピロヘータの螺旋回転型遊泳運動に関しては、

原稿受付 2003 年 2 月 18 日

*東京工業大学

*Tokyo Institute of Technology

顕微鏡下で観察される特殊な移動運動であるためか、これまでにそれに関する運動学の研究はほとんどなく、生物学者によるいくつかの観察結果の報告や、その運動生成機構に関する生体構造に関する考察などが報告されているのみであった。また、スピロヘータの螺旋回転型遊泳運動を工学的に利用するという立場の研究は、世界的にもこれまでまったくなされていなかったと考えられる。

このように、スピロヘータの螺旋回転型遊泳運動は従来注目されておらずほとんど研究されていなかったが、これを工学的に検討してみると二つの有効性が予測されると筆者らは考えている。第1の有効性は、すでに述べたように体の屈曲運動のみで推進できるというヘビ型遊泳形態の一種であるため、完全密閉型の遊泳機構が実現できる点である。そして第2の有効性は、この遊泳法が体幹を有限角屈曲させる運動によって体幹をコイルスプリング状に保ち、スクリューのような無限回転運動を生成する遊泳運動であるため、スピロヘータの体幹はそのすべての部分が推進力生成に寄与できるという特性を発揮するという点である。このような特性の優位性は、Fig. 1 に示すヘビの推進型体型を成す海ヘビやウナギの遊泳と比較すると明らかと思われる。Fig. 1 はヘビの体幹の法線方向に出ている推力の大きさの分布を示したものであるが、この体型では推力は体幹のO点近傍では生成できるがP点近傍ではほとんど生成できないからである[7]。

なお、このような螺旋回転型遊泳運動はスピロヘータのような原始生物でのみ観察され、ヘビやウナギのような高等生物では見られない。このことから、この螺旋回転型遊泳法には何か基本的な問題点があるという見方もある。しかし筆者らは、高等生物がこのような回転運動で推進しないのは、この運動を行うと中枢神経系も回転し続けるため、目が回ってしまって正しく動けなくなるというようなことが原因ではないかと推察している。そしてもしこれが原因であれば、スピロヘータの螺旋回転型遊泳運動を機械モデルで実現することは、重力センサを体幹の中枢部に装備して操舵するなどの技術の導入で容易に対処でき、工学的な利用の障害とはならないであろう。

以上のことから、本研究ではヘビのような細長い形態をなす移動体の水陸両用運動の実現を目的として、これまで工学的な検討がほとんどなされていなかったスピロヘータの螺旋回転型遊泳運動を対象として研究を進め、それを実現する機械モデルの製作を試みることにする。

本論文では、第2章で基本的なスピロヘータの運動メカニズムについて検討し、その運動メカニズムの特性を明らかにする。ついで、第3章でスピロヘータの運動を実際の機械モデルで実

現するための機械モデル構成法と運動制御法について検討を行い、第一次試作モデル HELIX-I の設計と遊泳実験の結果を報告する。

2. スピロヘータの螺旋回転型遊泳運動の力学

2.1 観測されているスピロヘータ運動

スピロヘータとは Fig. 2 に示すような全長 5~15 [μm] の微生物である[8]。歯槽膿漏などの原因となるスピロヘータは、Fig. 3 (a) のようにコイルスプリングのような形状を成し、高速回転することで 40 [$\mu\text{m/s}$] 程度で動き回ることが顕微鏡下で観察されている[9]。このスピロヘータの「螺旋回転型遊泳運動」の最大の特徴は、全体幹をコイルスプリングのような形態に保ちながら回転推進するという点である。Fig. 1 に示すような水中遊泳運動を生み出す体幹の左右運動では、体幹が生み出す内部力は体幹の左右方向の運動によってバランスを取ることが容易に推定できる。また、多くのバクテリアの運動で観察される Fig. 3 (b) のような胴体に対して、螺旋形状の鞭毛を回転型アクチュエータで 10,000 [rpm] 程度的高速回転を行う微生物では、鞭毛が生じる回転反力は胴体によって相殺することが可能である。この効果は、スクリューの回転反力を胴体の逆向きの傾きで支える船舶と同様と考えられる。しかし、本研究で対象とするスピロヘータの螺旋回転型遊泳運動は、Fig. 2 あるいは Fig. 3 (a) のように体幹全体がコイルスプリング状を成し、その全体の体幹が回転運動する。

スピロヘータの螺旋回転遊泳運動はこのように体幹全体を回転させながら推進するが、そのコイルスプリング状の体幹を回転運動させるときに生じる反作用がどのように支えられているかは必ずしも自明でない。そのため本章では、このような運動がなぜ生成できるかを検討していくことにする。

この推進のメカニズムとして考えられるのは、コイルスプリング状の体幹が推進方向を向いた中心軸周りに回転する一種の公転運動は、体幹が体幹の軸周りに回転するという一種の自転運動によって生成されるという仮定であろう。このような運動メカニズムで、本当にスピロヘータのような螺旋回転推進運動が実現できるかを以下で検討する。

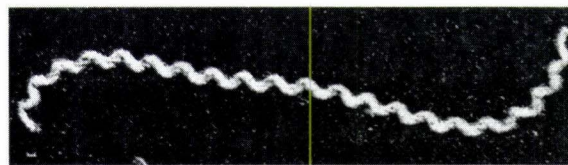


Fig. 2 Spirochete [8]

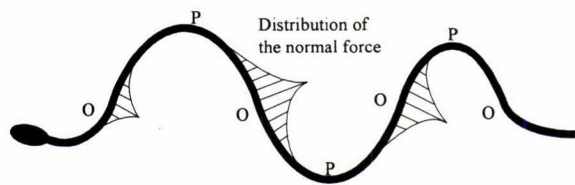


Fig. 1 Distribution of the normal force in creeping motion of the snake

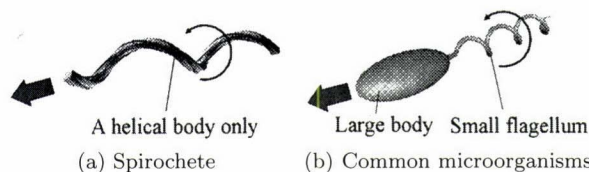


Fig. 3 Comparison of the propulsive motion of the microorganisms

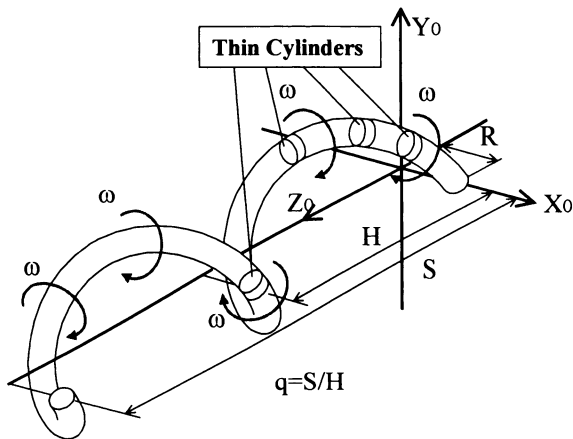


Fig. 4 The model of the helical body for the spirochete

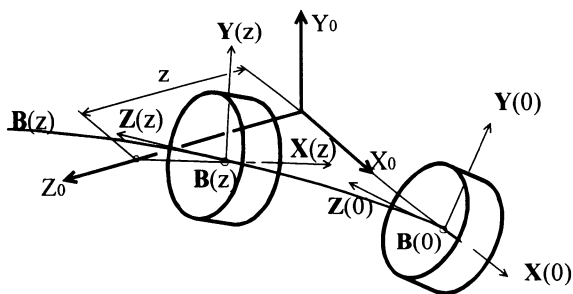


Fig. 5 The coordinate system of the segment of helical body

2.2 スピロヘータ運動の基本原理解析の準備

スピロヘータの運動を解析するために、螺旋体を Fig. 4 のように無限につながった薄円柱からなる連続体とする。すなわち、薄円柱の屈曲する方向を一定の割合で円柱の軸周りに回転させることで螺旋形を作っていると想定する。この状態ですべての関節の屈曲方向を同時に変化させれば、螺旋形状を保ったまま捻転運動が実現可能である [10]。捻転運動により見掛け上円柱自身が円柱軸周りに回転すると、スピロヘータのサイズでは微小でレイノルズ数が十分に小さいために流体の粘性による摩擦の影響が大きくなり、この運動によって各円柱軸周りにトルクが生成される。このトルクが螺旋全体にわたって加算され、螺旋全体を回転させる力を生成すると予測される。この効果を以降シミュレーション解析してみることにする。

まず解析の準備として、Fig. 4 のように螺旋体全体の座標系を $O-X_0Y_0Z_0$ として螺旋の回転軸を Z_0 座標とし、螺旋の開始点は X_0 軸上にあると仮定する。また螺旋の半径は R 、螺旋全体の進行方向長さは S 、螺旋の 1 周期の長さは H （よって螺旋巻数 q は S/H ）とする。

このとき、螺旋形状を構成する細長い体幹の Z_0 軸座標 z における位置座標は、

$$\mathbf{B}(z) = \left[R \cos \left(\frac{2\pi}{H} z \right), R \sin \left(\frac{2\pi}{H} z \right), z \right]^T \quad (1)$$

と示される。また、体幹座標系 $\alpha-XYZ$ を、Fig. 5 のように原点が円柱体幹の任意の点 $\mathbf{B}(z)$ 上であって、その Z 軸を体幹の

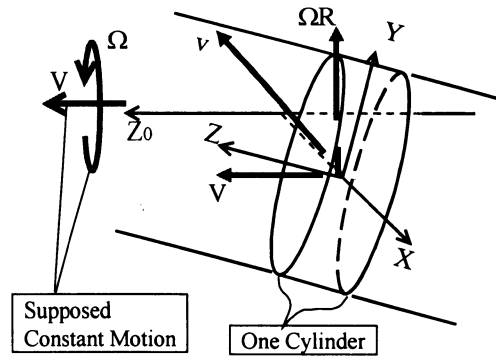


Fig. 6 Motion and force acting on a segment of helical body

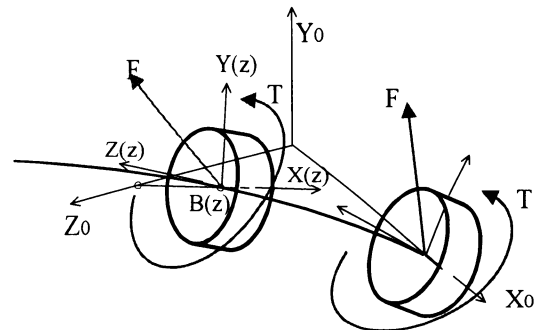


Fig. 7 Total forces acting on a segment of helical body

軸方向、 X 軸を Z_0 軸と直交し体幹に交わる軸のうち螺旋体幹外側へ向かう方向の軸、そして Y 軸はこれら XZ 軸に直交する軸と定義する。このように体幹座標系 $\alpha-XYZ$ を取ると、捻転運動による自転運動はどの部位においても体幹座標系の Z 軸回りの回転運動となる。

さて、定常状態として螺旋体が公転運動として Z_0 軸回りに速度 Ω で螺旋回転を行い、その結果として体幹全体は Z_0 軸方向に速度 V で推進すると仮定しておくことにする。このような運動仮定すると、すべての体幹は Fig. 6 のように $Y-Z$ 平面内を速度 V と ΩR の合成速度 v で動くことになる。すなわち、螺旋体幹の各部の運動を $\alpha-XYZ$ 座標系で表現すると、公転運動が起こるときのすべての部分の運動は同じ形式で表現できることが分かる。

2.3 各力の成分が全体に与える影響力

以上のように、自転運動（螺旋捻転）と公転運動（螺旋回転）とそれに伴う並進運動（推進）が生成されるのであれば、その運動は体幹のどの部位の体幹座標系 $\alpha-XYZ$ においても、 Z 軸周りに回転しながら平面 $Y-Z$ 内の方向に並進運動を行う運動として同等に扱えることになる。そして、この運動が流体中で行われたときに生成する力 $\mathbf{F}$ とトルク $\mathbf{T}$ は、Fig. 7 のようにすべての体幹部で発生し、これらはすべてそれぞれの体幹座標系 $\alpha-XYZ$ を用いて同様に記述できることになる。すなわち任意の点 $\mathbf{B}(z)$ での力 $\mathbf{F}$ の $\alpha-XYZ$ 座標系での成分 F_X, F_Y, F_Z とトルク $\mathbf{T}$ の $\alpha-XYZ$ 座標系での成分 T_X, T_Y, T_Z は常に一定となる。

さて、螺旋体全長に沿って発生した力 $\mathbf{F}(F_X, F_Y, F_Z)^T$ の各成分ごとの総和によって生成される螺旋体全体の並進加

速度を $\dot{\mathbf{V}}(F_X)$, $\dot{\mathbf{V}}(F_Y)$, $\dot{\mathbf{V}}(F_Z)$, また角加速度を $\dot{\mathbf{\Omega}}(F_X)$, $\dot{\mathbf{\Omega}}(F_Y)$, $\dot{\mathbf{\Omega}}(F_Z)$ とし, 螺旋体全長に沿って発生したトルク $\mathbf{T}(T_X, T_Y, T_Z)^T$ の各成分ごとの総和によって生成される螺旋体全体の角加速度を $\dot{\mathbf{\Omega}}(T_X)$, $\dot{\mathbf{\Omega}}(T_Y)$, $\dot{\mathbf{\Omega}}(T_Z)$ としたとき, それらは以下のように誘導できる.

$$\dot{\mathbf{V}}(F_X) = \frac{1}{M} \cdot \int_0^S F_X \cdot \mathbf{X}(z) dz = \mathbf{K}[\dot{\mathbf{V}}(F_X)] \cdot F_X \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{V}}(F_Y) = \frac{1}{M} \cdot \int_0^S F_Y \cdot \mathbf{Y}(z) dz = \mathbf{K}[\dot{\mathbf{V}}(F_Y)] \cdot F_Y \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{V}}(F_Z) = \frac{1}{M} \cdot \int_0^S F_Z \cdot \mathbf{Z}(z) dz = \mathbf{K}[\dot{\mathbf{V}}(F_Z)] \cdot F_Z \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{\Omega}}(F_X) &= \mathbf{I}^{-1} \cdot \int_0^S F_X \cdot (\mathbf{B}(z) - \mathbf{G}) \times \mathbf{X}(z) dz \\ &= \mathbf{K}[\dot{\mathbf{\Omega}}(F_X)] \cdot F_X \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{\Omega}}(F_Y) &= \mathbf{I}^{-1} \cdot \int_0^S F_Y \cdot (\mathbf{B}(z) - \mathbf{G}) \times \mathbf{Y}(z) dz \\ &= \mathbf{K}[\dot{\mathbf{\Omega}}(F_Y)] \cdot F_Y \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{\Omega}}(F_Z) &= \mathbf{I}^{-1} \cdot \int_0^S F_Z \cdot (\mathbf{B}(z) - \mathbf{G}) \times \mathbf{Z}(z) dz \\ &= \mathbf{K}[\dot{\mathbf{\Omega}}(F_Z)] \cdot F_Z \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{\Omega}}(T_X) = \mathbf{I}^{-1} \cdot \int_0^S T_X \cdot \mathbf{X}(z) dz = \mathbf{K}[\dot{\mathbf{\Omega}}(T_X)] \cdot T_X \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{\Omega}}(T_Y) = \mathbf{I}^{-1} \cdot \int_0^S T_Y \cdot \mathbf{Y}(z) dz = \mathbf{K}[\dot{\mathbf{\Omega}}(T_Y)] \cdot T_Y \quad (9)$$

$$\dot{\mathbf{\Omega}}(T_Z) = \mathbf{I}^{-1} \cdot \int_0^S T_Z \cdot \mathbf{Z}(z) dz = \mathbf{K}[\dot{\mathbf{\Omega}}(T_Z)] \cdot T_Z \quad (10)$$

ただし, ここで M は螺旋体の質量, $\mathbf{G}$ は重心の位置, $\mathbf{I}$ は慣性モーメントである. これらの流体から受ける力と, トルクによって螺旋体に生ずる加速度と角加速度の効果は, いずれも係数行列 $\mathbf{K} = (K_{X_0}, K_{Y_0}, K_{Z_0})^T$ によって記述しているが, この係数行列 $\mathbf{K}$ は螺旋形状とその構造によって決定される有次元の行列で質量および慣性モーメントの逆数に相当したものとなっている. 式 (2) において $\mathbf{K}[\dot{\mathbf{V}}(F_X)]$ は F_X の加速度 $\dot{\mathbf{V}}(F_X)$ に対する影響力と定義し, 式 (3) ~ (10) においても同様にそれぞれの F や T の加速度に対する影響力を表している. 以下におのおのの係数行列 $\mathbf{K}$ の各成分が螺旋全長 S が増大するに従ってどのように変化するかを検討する. このとき K の特性を示す評価として螺旋全長 S を基準に取ると螺旋の形状による評価をしにくいため, 螺旋巻数 $q (= S/H)$ を用いる. なお, 螺旋体の形状と体型のパラメータは, 螺旋形状の半径 R は 10, 周期長 H は 100, 胴体直径は 8, 密度は 1 と与える. また胴体全体の質量 M および慣性モーメント $\mathbf{I}$ の値は, 胴体を構成する体幹の直径と密度によって誘導する.

また係数行列 $\mathbf{K}$ のうち Z_0 成分 K_{Z_0} はそのまま誘導するが, X_0 成分と Y_0 成分については,

$$K_{X_0 Y_0} = \sqrt{K_{X_0}^2 + K_{Y_0}^2} \quad (11)$$

で定義する合成成分 $K_{X_0 Y_0}$ で特性を記述することとした. コンピュータによりグラフ化した結果を **Fig. 8** に示す.

Fig. 8 の結果から, $\mathbf{K}[\dot{\mathbf{V}}(F_X)]$, $\mathbf{K}[\dot{\mathbf{\Omega}}(F_X)]$, $\mathbf{K}[\dot{\mathbf{\Omega}}(T_X)]$ では, F_X と T_X が Z_0 軸に常に直交している成分のため Z_0 成分 K_{Z_0} は常に 0 であること, また螺旋全長が延びて螺旋巻数 q が増えるとすべての加速度の $X_0 Y_0$ 成分は 0 に収束していき, Z_0 成分のみが残されることが分かる. このことから, スピロヘータの螺旋捻転運動においては, 螺旋巻数がある程度大きければ, 螺旋体は Z_0 軸回りに回転しながら Z_0 軸方向に推進する加速度運動を生成できることが明らかとなった.

2.4 スピロヘータ運動の生体駆動系の推定

以上の解析から, スピロヘータが螺旋形状を成し, その体幹が体幹軸の周りに自転すると, 螺旋形状の体幹全体が回転しながら推進できることが明らかになった. それではこのような体幹の運動はスピロヘータのどのような生体メカニズムで生成されるのであろうか.

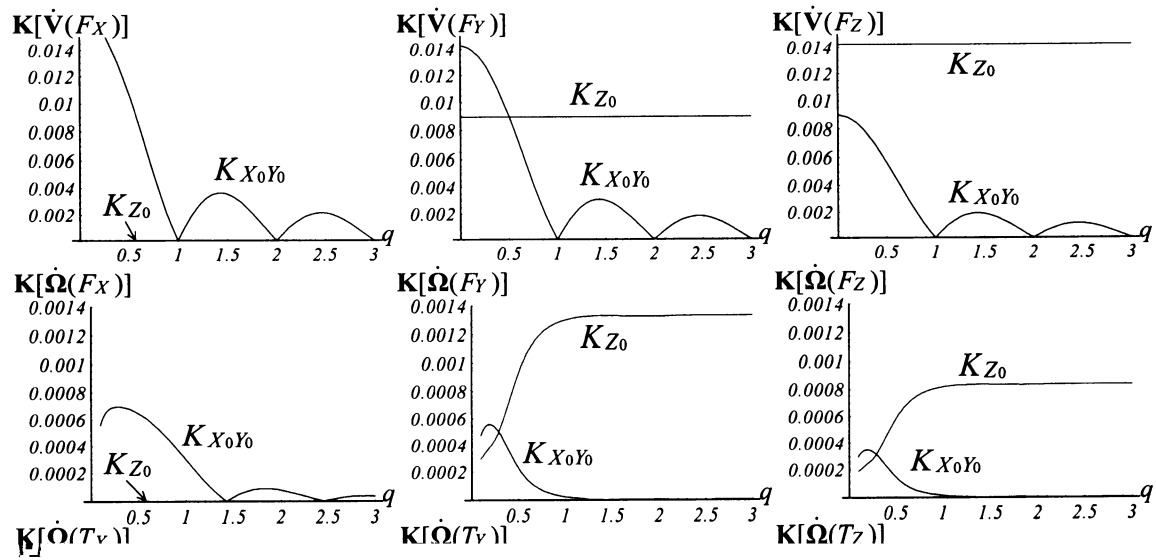
このメカニズムとしては, 三つの仮説が考えられる.

第 1 の仮説は, すでに仮定してきたように円柱状の体幹の各部分が, その屈曲の方向を体幹の軸に沿って一定の割合で回転させていくことで実現するという運動メカニズムである. しかしこの運動メカニズムを作り出す駆動機構は, 実際のスピロヘータでは観察されていない. そのため, 少なくともスピロヘータの駆動系として, この仮説は妥当でない.

第 2 の仮説は, **Fig. 9** のようなスピロヘータの構造を考慮して筆者らが提案するものである. スピロヘータには螺旋状の体幹に沿ってさらに螺旋状となった軸索が複数巻かれている. そのため, もしもこの軸索が筋繊維として作用し, 次々に収縮を繰り返せば, 体幹は体幹軸周りに回転を始める. 螺旋体型の内側に位置する軸索の全長は短く, 外側に位置する軸索の全長は長くなる. そのため, 軸索の長さが変化すればこの運動が生成できるという運動メカニズムの仮説はかなり実際的と思われる [11]. 筆者らは, この仮定が正しいと最近まで考えていたが, 生物学分野の近年の研究では以下の第 3 の仮説が最も正しいとされているようである.

第 3 の仮説は, スピロヘータの体幹は, **Fig. 10** のように柔軟な中心軸部と, その中心軸を囲むチューブ形状を成すゼリー状の膜で覆われている. そして中心軸とゼリー状の皮膜の間には, 螺旋形状を成す硬い軸索が何本か通っている. そして軸索と中心軸の間には, 生物分子モーターと呼ばれる ATP を合成する際に用いる水素イオンの流れを制御するマイクロモーターが存在し, スパイラル状を成す軸索に沿って中心軸と, それに引かれて外側の皮膜が回転させられるというメカニズムである [9] [12].

ただし, 現在までに行われた研究では, このように運動のメカニズムは明確化されてきているものの, この体幹に沿った回転運動がスピロヘータの螺旋推進運動にどのように変換されるかの検討は, まだまったく行われていなかったようである. その意味で本章の考察は, スピロヘータの螺旋回転型遊泳運動に関して, バイオメカニカルな立場から一つの新たな知見を与えたものと筆者らは考えている.



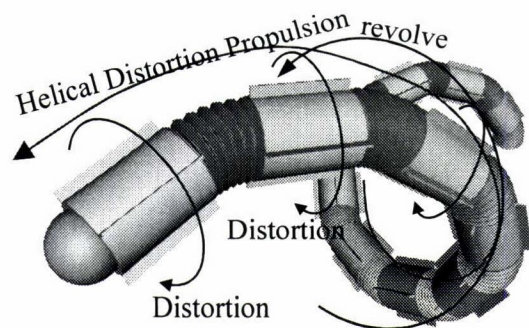


Fig. 11 Overall figure and basic motion of "HELIX"

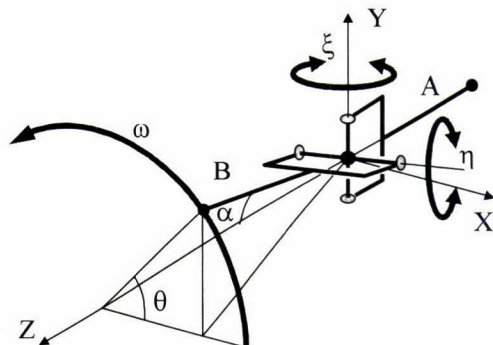


Fig. 12 Actuator system of the HELIX using universal joint mechanism

の効果は期待できない。そこで HELIX の各節には水切り板を取り付け、捻転運動によって生じる体幹軸周りの回転をトルクに変換することで推進力を生成するように構成する。

製作する HELIX の概観を Fig. 11 に示す。螺旋回転推進による遊泳の基本的原理は、まず HELIX のすべての関節が体幹軸方向に一定の位相差を持ちながら捻転運動を生成することによって螺旋捻転運動を生成し、見掛け上各関節は関節軸周りの回転運動を生成する。そして、これにより節表面に取り付けられた水切り板が流体からの力を受けることによって螺旋体が軸周りに回転し、螺旋軸方向に推進運動を行うというものとなっている。

3.2 "HELIX" の関節の機構

捻転運動は、一般的には Fig. 12 のようなユニバーサル継手の中央にある十字部品の角度 ξ と角度 η をアクチュエータによって駆動することで、A 側の軸と B 側の軸の間の角度を α に保ったまま B 側先端を一定角速度 ω で円運動させることで生成可能である。この動きは A 軸と B 軸を固定した視点で見ると、Fig. 13 のように A 軸 B 軸間の角度を α に保ったまま A 軸と B 軸を同時にそれぞれの軸周りに角速度 ω で回転する運動となっている。しかし、よく知られているように、ユニバーサルジョイントは等速ジョイントでないため、この運動を行おうとすると Fig. 14 のように A 側と B 側で若干の回転角度に差が生じる。

一方、HELIX の関節部は防水性を生み出すため蛇腹で囲まれるが、蛇腹は柔軟な材料からできた連続体であるためどの方向に曲げても同じように曲がる。つまり、蛇腹は等速運動伝達

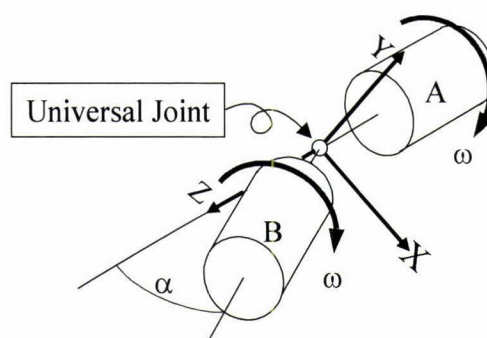


Fig. 13 Distortion motion by the universal joint mechanism

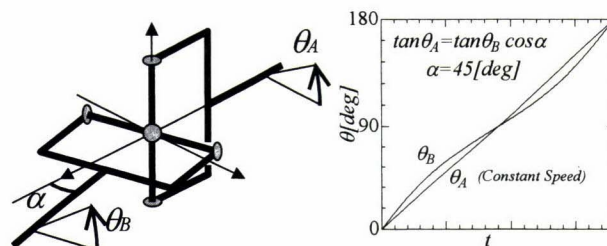


Fig. 14 Non-constant velocity motion of the universal joint

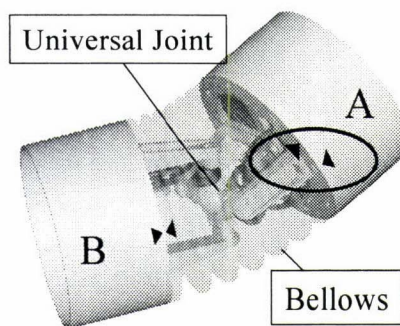


Fig. 15 Torsional motion between bellows and body produced by the effect of universal joint mechanism

機構とみなせる。

そのため、不等速回転をするユニバーサルジョイントを用いた関節を等速回転をする蛇腹で覆って捻転運動を行うと、Fig. 15 のように捻転運動に従って連結部において蛇腹とジョイントに角度差が生じ、節と蛇腹の両端を固定して密閉状態を維持したままでは捻転することは難しい。この問題点は、筆者らは初め重視していなかったが、実際に試作して実験してみると、その効果は無視し得ないものであることが明確になった。

この問題を解決するため、HELIX の関節機構には Fig. 16 に示すような中間ブロックを有する新しいユニバーサル機構を導入した。普通のユニバーサル継手では中央にある十字型の部品の η 軸と ξ 軸の間の角度は 90 度に固定されている。それに対し開発したユニバーサル継手は、この η 軸と ξ 軸の間の相対角度を Fig. 16 に示すように、微小角度であるが回転自在としたものである。このように構成されているため、このユニバーサル継手は位置の 3 自由度、つまり回転の中心位置を拘束しながら、姿勢の 3 自由度を自由に保つ機構となっている。そして

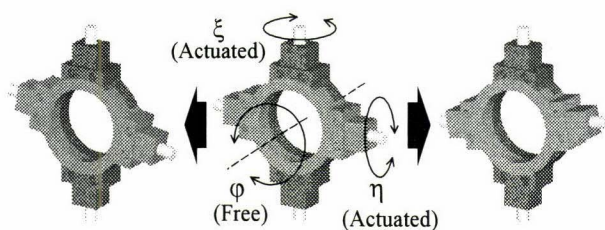


Fig. 16 Introduced cross joint with 1 DOF for the new universal joint mechanism

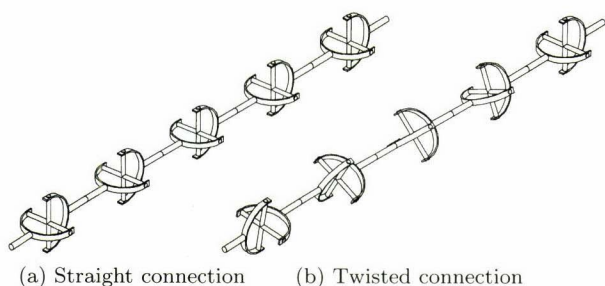


Fig. 17 2 Types of the connection of the joints

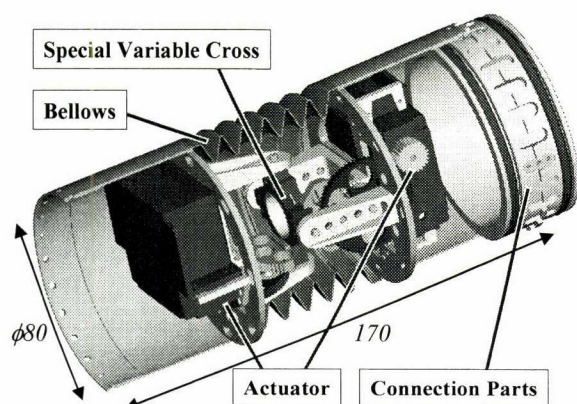


Fig. 18 Unit mechanism of the HELIX

このうちの η 軸と ξ 軸の 2 軸をモータで駆動し、角度 φ は自由回転するように構成されているので、等速回転を行う蛇腹の運動にも追従することが可能となり全体として堅牢で完全密閉型の等速伝達機構が実現できるものとなっている。

HELIX のユニバーサル機構を連結する最も基本的な構成は、Fig. 17 (a) のようにすべての関節を真直ぐに連結するものである。このように連結しておけば、通常のほふく推進運動や、巻き付き把持動作など多様な運動が可能となり、水中では順に位相をずらして捻転運動を行うことで螺旋捻転運動が生成可能となる。ただし本試作モデルでは、螺旋捻転運動を簡便に生成することを優先し、Fig. 17 (b) の様に関節を胴体軸回りに振りながら連結し、すべての関節に同じ捻転運動を行わせることで螺旋捻転運動を生成可能とした。

3.3 試作モデル HELIX-I の駆動系設計

Fig. 18 のように関節部とそれを挟んで両側に胴体節半分を有する構造を HELIX の 1 ユニット機構として採用した。このユニットには 2 自由度関節機構を駆動するために二つのサーボモータ

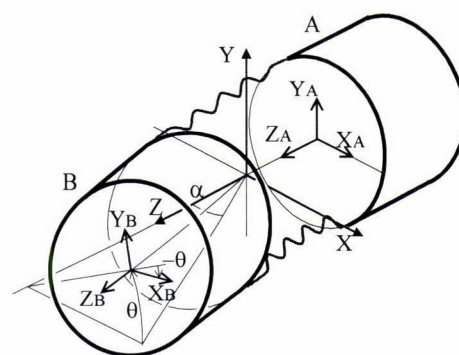


Fig. 19 Notation of the motion produced by the bellows

タを内蔵させた。使用したサーボモータは RC サーボ (Futaba S5801) である。連結部品は O リングを用いた防水構造とし簡単に節の着脱ができるように構成した。また 15 [deg] ごとにキー溝を設け、キーにネジ穴をあけておくことで節表面に水切り板等の装備を 15 度間隔で可能とした。またこのキー溝によって節間の連結捩れ角度も 15 [deg] ごとに変えられるようにした。これらの機構は、今後最適な水切り板角度や遊泳姿勢を見つける実験に利用する予定である。各関節にはその節のサーボモータ用電池と、隣接するユニットとの通信用と自節モータ制御用の回路を組み込んだ。このような構造を導入することで、制御用コンピュータを先端節に装備するだけで、ピッチ角とヨー角の制御信号は全節に指示可能とすることができた。

3.4 捻転運動を行うための関節角度の制御

HELIX により定速螺旋捻転運動を行うためには、各ユニットの関節が捻転角度に一定の位相差を持って定速捻転運動を生成する必要がある。そしてこのような定速捻転運動は、隣接する節の軸間の角度を一定に保ったまま捻転角度を変化させることで行うことが可能である。HELIX に採用した関節機構はヨー軸とピッチ軸をモータにより駆動しヨー角とピッチ角を制御することで捻転運動を生成するものとした。ただし試作したモデルでは、すでに論じたようにヨー角とピッチ角が直交を保たない特殊なリンク構造を採用した。そのため、希望の捻転角度にさせるためのヨー角とピッチ角の計算には特別の手法が必要となる。また螺旋形状を決定するにも、螺旋形状特有の決定法が必要である。

そのため本節では、まず初めにヨー角、ピッチ角の制御によって、望みの節間角度と捻転角度を生成する制御手法を述べ、ついで誘導した節間角度と節間位相差から螺旋形状を特徴付ける螺旋半径と螺旋ピッチを決定して全体としての螺旋形状を定める制御法を述べることにする。

まず、軸間角度 α と捻転捻転角度 θ に対してヨー角 η とピッチ角 ξ がどのように表記できるかを明確化するため、HELIX による捻転運動を、外部の蛇腹の運動によって得た場合と、その同じ運動を内部のリンク機構の屈曲運動で生成した場合に分けて比較することとした。

まず外部の蛇腹については、Fig. 19 のような座標系で捻転運動を行った動作を行う、すなわち、胴体 A と胴体 B の軸の交点を原点にとり、胴体 A の軸を Z 軸として、胴体 B の軸を

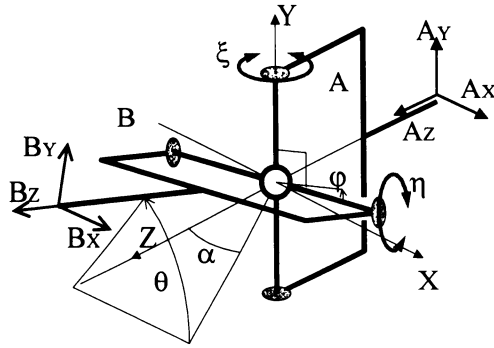


Fig. 20 Notation of the motion produced by the universal joint actuators

Z 軸に対して角度 α 傾けて XZ 平面から角度 θ 回転させたものであるとする。このとき、振れを発生させずに胴体 A の座標系を胴体 B の座標系に変換するための座標変換行列 $\mathbf{E}_J$ は、X 軸周りの回転変換行列 $\mathbf{E}^i$ 、Y 軸周りの回転変換行列 $\mathbf{E}^j$ 、Z 軸周りの回転変換行列 $\mathbf{E}^k$ を用いて以下のように示すことが可能である [13]。

$$\mathbf{E}_J = \mathbf{E}^{k\theta} \mathbf{E}^{j\alpha} \mathbf{E}^{k(-\theta)}$$

$$= \begin{bmatrix} C_\theta^2 C_\alpha + S_\theta^2 & C_\theta C_\alpha S_\theta - C_\theta S_\theta & C_\theta S_\theta \\ C_\theta C_\alpha S_\theta - C_\theta S_\theta & C_\alpha S_\theta^2 + C_\theta^2 & S_\theta S_\alpha \\ -C_\theta S_\theta & -S_\theta S_\alpha & C_\alpha \end{bmatrix} \quad (12)$$

ただし、ここで $C_\alpha = \cos \alpha$, $S_\alpha = \sin \alpha$ とした。

一方、内部のリンク機構の屈曲運動は、Fig. 20 に示すようにリンクの 3 軸がそれぞれ η , ξ , φ の回転を行ったとするのであれば、胴体 A の座標系を胴体 B の座標系に変換するための座標変換行列 $\mathbf{E}_L$ は以下のように表記できる。

$$\mathbf{E}_L = \mathbf{E}^{j\xi} \mathbf{E}^{k\varphi} \mathbf{E}^{i\eta}$$

$$= \begin{bmatrix} C_\xi C_\varphi & -C_\xi S_\varphi C_\eta + S_\xi S_\eta & C_\xi S_\varphi S_\eta + S_\xi C_\eta \\ S_\varphi & C_\varphi C_\eta & -C_\varphi S_\eta \\ -S_\xi C_\varphi & S_\xi S_\varphi C_\eta + C_\xi S_\eta & -S_\xi S_\varphi S_\eta + C_\xi C_\eta \end{bmatrix} \quad (13)$$

以上に示した外側の蛇腹による座標変換行列 $\mathbf{E}_J$ と、内部のリンク機構の屈曲運動による座標変換行列 $\mathbf{E}_L$ は等価でなければならない。そのためこれらの行列の 2 行 3 列目の要素 $E_{2,3}$ と、2 行 2 列目の要素 $E_{2,2}$ の比 $E_{2,3}/E_{2,2}$ から、また 3 行 1 列目の要素 $E_{3,1}$ と、1 行 1 列目の要素 $E_{1,1}$ の比 $E_{3,1}/E_{1,1}$ から、角 η と角 ξ は軸間角度 α と捻転捻転角度 θ の関数として以下のように記述できることが分かる。

$$\frac{-C_\varphi S_\eta}{C_\varphi C_\eta} = \frac{S_\theta S_\alpha}{C_\alpha S_\theta^2 + C_\theta^2}$$

$$\therefore \eta = \text{ATAN} \left(\frac{\sin \alpha \cdot \sin \theta}{\cos \alpha \cdot \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} \right) \quad (14)$$

$$\frac{-S_\xi C_\varphi}{C_\xi C_\varphi} = \frac{-C_\theta S_\alpha}{C_\theta^2 C_\alpha + S_\theta^2}$$

$$\therefore \xi = \text{ATAN} \left(\frac{\sin \alpha \cdot \cos \theta}{\cos \alpha \cdot \cos^2 \theta + \sin^2 \theta} \right) \quad (15)$$

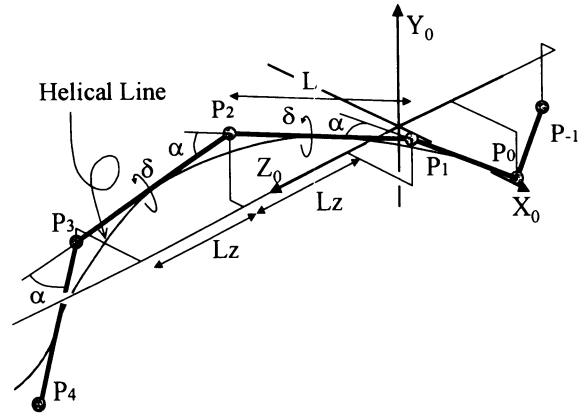


Fig. 21 Discontinuous model of the HELIX

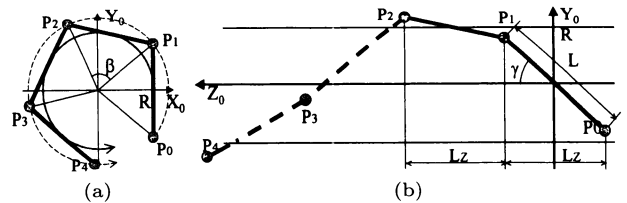


Fig. 22 Front and side view of the HELIX, which coils around inscribed circle with diameter R

HELIX で螺旋体を構成する場合の形態の決め方は、Fig. 21 のように各節の中心軸を Z_0 軸に沿った内接円筒 (inscribed circle) に接するように各節をコイル状に曲げていくものと想定した。そしてこの螺旋の形状は、内接円筒の半径である「螺旋半径 R 」と、第 1 節を Y_0 - Z_0 平面に投影したとき、この第 1 節と Z_0 軸とのなす角である「螺旋の仰角 γ 」の二つを形態決定パラメータにすることとした。

以上のように HELIX の螺旋構造を定め、Fig. 22 (a) に示すように、螺旋構造の隣接する関節 P_i と P_{i+1} の位置を X_0 - Y_0 平面に投影したとき、それぞれの点対原点に対して成す角を β とし、また各節の Z_0 軸方向への投影長さを L_Z ($L_Z = L \cdot \cos \gamma$) とすると、各関節の軸間角度 α と捻転角度の位相差 δ は以下のようにして誘導可能である。

まず、螺旋体の任意の関節の位置座標 $\mathbf{P}_n$ は以下のように示される。

$$\mathbf{P}_n = \begin{pmatrix} R / \cos(\beta/2) \cdot \cos(n \cdot \beta - \beta/2) \\ R / \cos(\beta/2) \cdot \sin(n \cdot \beta - \beta/2) \\ (n - 1/2) \cdot L_Z \end{pmatrix} \quad (16)$$

ここで、関節間の長さが L であるから

$$L = |\mathbf{P}_{n+1} - \mathbf{P}_n| = \sqrt{4R^2 \tan^2(\beta/2) + L_Z^2 \cos^2(\gamma)} \quad (17)$$

が成り立つ。これを展開すると、 β と γ の関係が以下のように求まる

$$L \sin(\gamma) = 2R \tan(\beta/2)$$

$$\therefore \beta = 2 \cdot \arctan \left(\frac{L}{2 \cdot R} \sin(\gamma) \right) \quad (18)$$

このとき節間軸角度 α は

$$\begin{aligned}\cos \alpha &= \frac{(\mathbf{P}_{n+1} - \mathbf{P}_n) \cdot (\mathbf{P}_{n+2} - \mathbf{P}_{n+1})}{|\mathbf{P}_{n+1} - \mathbf{P}_n| |\mathbf{P}_{n+2} - \mathbf{P}_{n+1}|} \\ &= \frac{(2R \tan(\beta/2))^2 (1 - 2 \sin^2(\beta/2)) + L^2 \cos^2(\gamma)}{L^2} \\ &= 1 - 2 \sin^2(\beta/2) \sin^2(\gamma)\end{aligned}\quad (19)$$

と与えられるが、ここで、

$$\cos \alpha = 1 - 2 \sin^2(\alpha/2) \quad (20)$$

を式 (18) に代入すれば

$$\sin(\alpha/2) = \sin(\beta/2) \sin(\gamma) \quad (21)$$

が求まる。そして式 (18), (21) より β を消去すると、軸間角度 α が螺旋半径 R と仰角 γ の関数として以下のように求まる。

$$\alpha = 2 \cdot \arcsin \left(\frac{\sin^2(\gamma)}{\sqrt{4R^2/L^2 + \sin^2(\gamma)}} \right) \quad (22)$$

さらに位相差 δ については、 $\mathbf{P}_n, \mathbf{P}_{n+1}, \mathbf{P}_{n+2}$ の三つの関節点が形成する平面と $\mathbf{P}_{n+1}, \mathbf{P}_{n+2}, \mathbf{P}_{n+3}$ の三つの関節点が形成する平面の成す角度として誘導できる。しかし、一般の関節間でこの値を誘導するのは煩雑であるため、特に $n = -1$ の特例で誘導することにした。この場合、関節 $\mathbf{P}_{-1}-\mathbf{P}_0$ と関節 $\mathbf{P}_2-\mathbf{P}_1$ が X_0 軸回りに回転対象となっていることから、節 $\mathbf{P}_0-\mathbf{P}_1$ が Z_0 軸と平行になるように X_0 軸回りに仰角 γ だけ回転させると、Fig. 23 のように平面 $\mathbf{P}_{-1}-\mathbf{P}_0-\mathbf{P}_1$ および $\mathbf{P}_0-\mathbf{P}_1-\mathbf{P}_2$ は X_0Y_0 平面に直交し位相差 δ が X_0Y_0 平面上に投影可能である。

このとき関節点 $\mathbf{P}'_2, \mathbf{P}'_1$ はそれぞれ

$$\begin{aligned}\mathbf{P}'_1 &= \mathbf{E}^{i\gamma} \cdot \mathbf{P}_1 = (R, 0, P'_{1Z})^T \\ \mathbf{P}'_2 &= \mathbf{E}^{i\gamma} \cdot \mathbf{P}_2\end{aligned}\quad (23)$$

で表されるため、以下の関係式を容易に誘導可能である。

$$\begin{aligned}\tan(\delta/2) &= |\mathbf{P}'_{2Y}| / |R - \mathbf{P}'_{2X}| \\ &= \frac{|R \cos(\gamma) \tan(\beta/2) (3 - 4 \sin^2(\beta/2))|}{4R \sin^2(\gamma)}\end{aligned}\quad (24)$$

そして、式 (18), (24) より β を消去すると、位相差 δ が螺旋半径 R と仰角 γ の関係式として以下のように誘導できる。

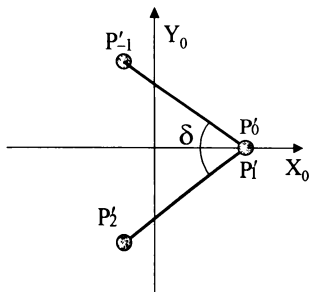


Fig. 23 Projection of joint posture to X_0Y_0 plane and the angle δ

$$\delta = 2 \cdot \arctan \left(\frac{L}{2 \cdot R} \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma \right) \quad (25)$$

以上のことから、半径 R で仰角 γ の螺旋構造を取りながら速度 ω で螺旋捻転運動を行うときの第 n 節の関節の時刻 t における角 $\eta_n(t)$ と角 $\xi_n(t)$ は、以下のように与えればよいことが分かる。

$$\eta_n(t) = \arctan \left(\frac{\sin \alpha \cdot \sin(\omega \cdot t + n \cdot \delta)}{\cos \alpha \sin^2(\omega \cdot t + n \cdot \delta) + \cos^2(\omega \cdot t + n \cdot \delta)} \right) \quad (26)$$

$$\xi_n(t) = \arctan \left(\frac{\sin \alpha \cdot \cos(\omega \cdot t + n \cdot \delta)}{\cos \alpha \cos^2(\omega \cdot t + n \cdot \delta) + \sin^2(\omega \cdot t + n \cdot \delta)} \right) \quad (27)$$

ただし、ここで α, δ は

$$\alpha = 2 \cdot \arcsin \left(\frac{\sin^2(\gamma)}{\sqrt{4R^2/L^2 + \sin^2(\gamma)}} \right) \quad (22)$$

$$\delta = 2 \cdot \arctan \left(\frac{L}{2 \cdot R} \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma \right) \quad (25)$$

である。

なお、このときの HELIX の全長 S と巻き数 q は連結節数が N であるならば、以下のように誘導可能である。

$$\begin{aligned}S &= (N+1) \cdot L_Z \\ &= (N+1) \cdot L \cdot \cos(\gamma)\end{aligned}\quad (28)$$

$$\begin{aligned}q &= ((N+1) \cdot \beta) / (2 \cdot \pi) \\ &= (N+1) \cdot \arctan \left(\frac{L}{2 \cdot R} \sin(\gamma) \right) / \pi\end{aligned}\quad (29)$$

なお、後述する HELIX の実験では δ は固定され、 α, ω のパラメータを変化させて遊泳体型を取らせた。この場合、 $\eta_n(t), \xi_n(t)$ は式 (26), (27) から直接求め、そのときの体系パラメータ R, γ と進行方向長さ S , 巻き数 q は

$$\gamma = \arcsin \left(\sin(\alpha/2) / \sqrt{1 - (\cos(\alpha/2) \cdot \cos(\delta/2))^2} \right) \quad (30)$$

$$R = \frac{L}{2} \cdot \sin(\alpha/2) \cdot \frac{\cos(\alpha/2) \cdot \cos(\delta/2)}{1 - (\cos(\alpha/2) \cdot \cos(\delta/2))^2} \quad (31)$$

$$S = (N+1) \cdot L \cdot \frac{\cos(\alpha/2) \cdot \sin(\delta/2)}{\sqrt{1 - \cos^2(\alpha/2) \cdot \cos^2(\delta/2)}} \quad (32)$$

$$q = (N+1) \cdot \arccos(\cos(\alpha/2) \cdot \cos(\delta/2)) / \pi \quad (33)$$

と与えられる。

4. 試作した HELIX での遊泳実験

4.1 実験条件

以上の考察を元に 10 ユニットの HELIX を製作し、10 関節 (11 節) の索状能動により水中での螺旋回転推進の確認実験を行った。捻転位相差 δ は連結時に 60 [deg] で固定し、胴体軸間角度 α のみを 0~30 [deg] に変化させた。このとき螺旋巻数は上式 (33) より 1.8~2 巻と求まる。これは Fig. 8 に示したように比較的多くの $\mathbf{K}$ について Z_0 成分に対して X_0Y_0 成分が小さくなる。唯一この近傍で X_0Y_0 成分の大きくなる $\mathbf{K}[\Omega(F_X)]$

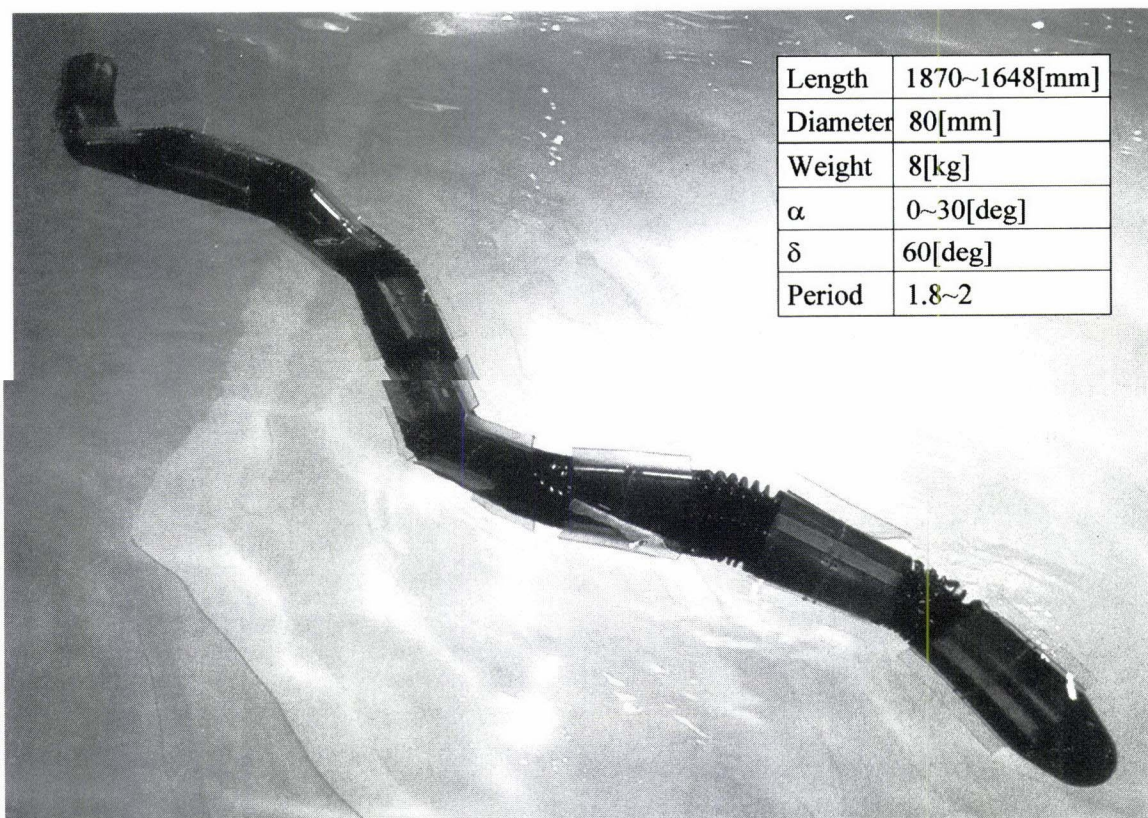


Fig. 24 Swimming motion of the "HELIX"

については、Fig. 6 に示したように各節が Y - Z 平面内での並進運動を行う場合、流体から受ける X 軸方向の力 F_X が Y 軸 Z 軸方向の力 F_Y , F_Z と比べて十分に小さいと考え、この螺旋巻き数を採用した。また仰角 $\gamma = 0 \sim 28$ [deg], 螺旋半径 $R = 0 \sim 61$ [mm], 進行方向長さ $S = 1,870 \sim 1,648$ [mm] となることは上式 (32) から誘導される通りである。本実験で用いた水切り板は、最も簡単な高さ 20 [mm], 幅 110 [mm], 厚さ 2 [mm] の長方形の板状のウレタンゴムで、各節に 4 枚ずつ軸に沿った方向に取り付けた。後端節には制御用コントローラとラジコンの受信機を搭載し、操縦者が軸間角度 α と捻転速度 ω を無線で指示すると搭載した制御用コントローラが関節部ユニバーサルジョイントのヨー角ピッチ角を算出し、それを各駆動系に指令することで螺旋捻転運動を生成する構造とした。

4.2 実験結果

HELIX はすべての節間角度 α がゼロである真直ぐな初期状態から、節間角度 α を変化させることで Fig. 24 のような螺旋遊泳体型を取らせた。先端を手で押さえて推進できない状態にして静止状態から捻転運動を開始すると、Fig. 8 に示した $K[\dot{\Omega}(T_Z)]$ の計算結果のように胴体全体が螺旋の軸周りに回転し始めることを確認した。そして、節間角度 α を約 20 [deg], 捻転速度 ω を約 2 [rad/s] にして手を放すと Fig. 25 のように約 15 [cm/s] で螺旋回転推進を行うことが確認できた。

なお、本論文の初めに行った解析では全節が水没している場合の螺旋回転推進について考察した。しかし、実際に製作した

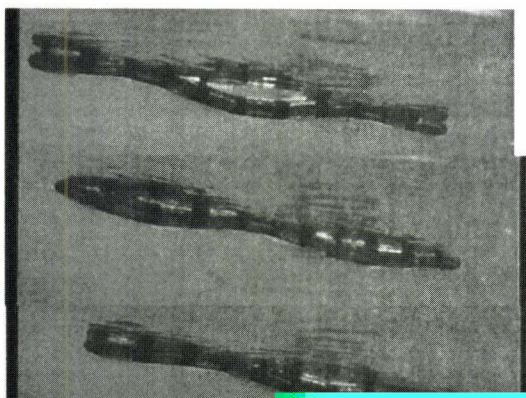
HELIX は若干比重が 1 より小さく胴体の一部が水面に出てしまった。その結果、水面に出た部分の水切り板が水をかかずに少しずつ横に並進してしまうという現象が観察された。

5. 結論と今後の課題

本研究では、自然界に存在する三次元運動を行うものとして微生物であるスピロヘータに注目し、この移動運動の有効性を議論した。そして、スピロヘータの運動である螺旋捻転運動の力学的解析を行うと同時に構造的解析を行い、この運動を索状能動体によって再現するための手法を考案した。さらに、気密で小型の等速ジョイント開発を行い、これにアクチュエータを搭載した 2 自由度関節を開発し、それらを複数個連結した気密型の螺旋回転型遊泳を行う索状能動体 HELIX を製作し、これを用いて水中遊泳実験を行い螺旋捻転運動によって螺旋回転推進が行えることを明らかにした。

我々は今後さらに以下のような研究を進める予定である。

- (1) スピロヘータ型の螺旋回転型遊泳とヘビ型の蛇行遊泳に関するより定量的な比較を行う。
- (2) スピロヘータ型の螺旋回転型遊泳を行う際に発生する力のバランスを考察し最適遊泳形状の検討を行う。
- (3) 索状能動体 HELIX の水切り板の取り付け方法などの最適設計法に関する検討を行う。
- (4) 索状能動体 HELIX の水中での自在な操舵制御システムを導入し遊泳実験を行う。



謝 辞 本研究は文部省科学研究費（COE 形成基礎研究費スーパーメカノシステム）を使用して行われました。

参 考 文 献

- [1] S. Hirose: Biologically Inspired Robots (Snake-like Locomotor and Manipulator). Oxford University Press, 1993.
- [2] G. Endo, K. Togawa and S. Hirose: "Study on self-contained and Terrain Adaptive Active Cord Mechanism," Proc. of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1399-1405, 1999.
- [3] K. Togawa, M. Mori and S. Hirose: "Study on Three-dimensional Active Cord Mechanism: Development of ACM-R2," Proc. of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2242-2247, 2000.