

繊毛・鞭毛運動のバイオミメティクス

小林俊一, 森川裕久

信州大学 繊維学部 機能機械学科 数理工学講座

1. はじめに

繊毛や真核生物の鞭毛は、それらの内部にある微小な管を能動的に滑らせて屈曲運動する。本研究ではこのメカニズムを模倣した新しい人工アクチュエータを考案・開発することを目的とする。

本報でははじめに人工アクチュエータを試作し、水中で動作させた際の推力特性を述べる。次に、人工アクチュエータの自律化のための基礎研究として、繊毛型の多リンク機構の最適動作を生成するコンピュータシミュレーションを行った結果について述べる。

2. 繊毛・鞭毛の屈曲機構

繊毛と真核生物の鞭毛は共通の内部構造を持っており、周囲に9本、中心に2本の微小管がある。周囲の微小管にはダイニンが附随し、Fig.1に示すようにダイニンは隣の微小管を動かして滑りを発生させ、滑りに抵抗する領域と自由に曲げられる領域が存在することによって屈曲が実現される。

3. 人工アクチュエータとその推力特性

3.1 人工アクチュエータ

2本の微小管の滑りを模倣した人工アクチュエータを考案、試作した。Fig.2にその構成図を示す。全長は30cmである。動作原理は微小管に相当する2本の柔軟体に、ダイニンに相当する電磁石を取り付け、電磁石同士の吸着力と反発力を利用して屈曲動作を発生させる。確実に滑らかな屈曲を実現するため、同図(B)に示すように、伸びに関して異方性のある布で全体を包み込ませた。

3.2 推力特性

Fig.3に駆動・測定系の構成図を示す。人工ア

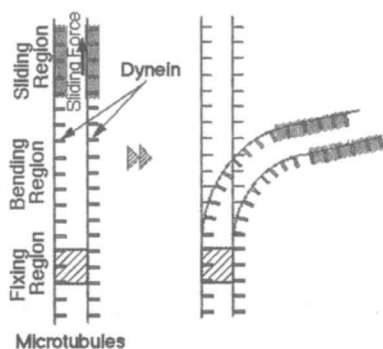


Fig. 1 Bending mechanism.

クチュエータは内部フレームからナイロン糸により吊るされ、水槽内で運動できるように設置される。推力は内部フレームにナイロン糸で繋がれたロードセルにより検出する。

Fig.4 に水中で運動している際の人工アクチュエータを示す。推力は大きく変動するが正の平均推力

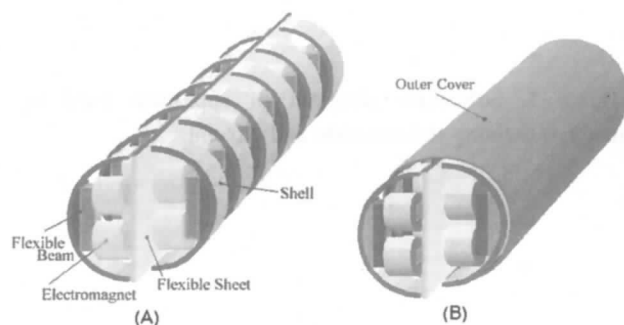


Fig. 2 Internal structure of the artificial actuator.

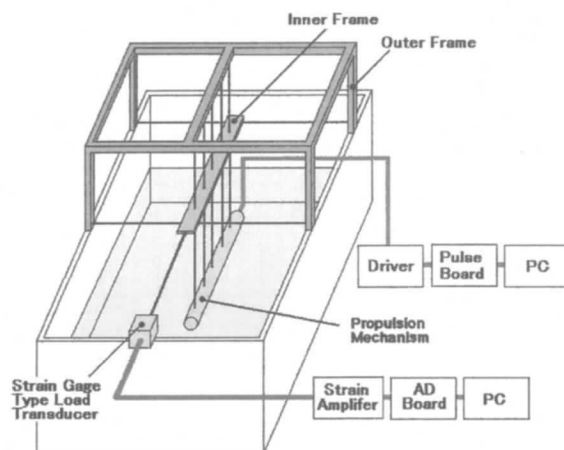


Fig. 3 Experimental system.

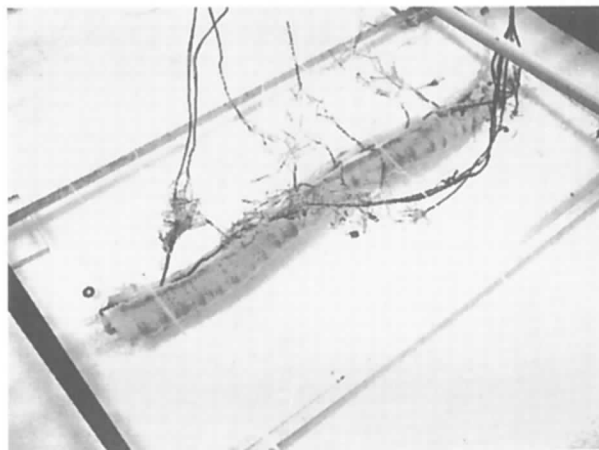


Fig. 4 The artificial actuator.

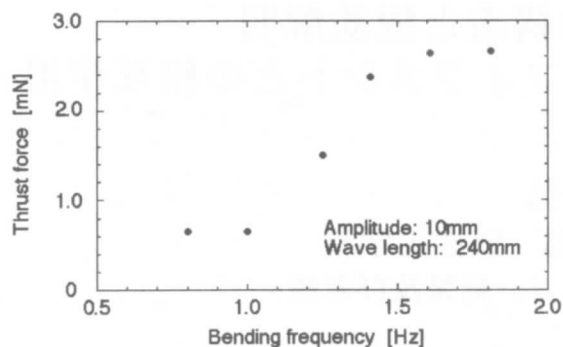


Fig. 5 Relationship between thrust force average and bending frequency.

を得ることを確認した。Fig.5に屈曲運動1周期における平均推力と屈曲運動周波数の関係を示す。平均推力は屈曲運動周波数の上昇に伴い増加するが、1.4Hz以上から増加率が少なくなる。これは屈曲機構の慣性力や水の抵抗が増加して、所定の振幅(10mm)が確実に得られなくなったためである。

4. 最適動作生成のシミュレーション

人工アクチュエータの自律化のための基礎研究として、生物のように自ら運動を決定するシステムの開発を検討している。その初期研究として、人工アクチュエータと構造は異なるが、繊毛型の多リンク機構の最適動作を生成するコンピュータシミュレーションを行った。

4.1 シミュレーションモデル

Fig.6に示すように複数の剛体リンクと回転関節からなる1本の多リンク機構を設定する。周期的動作を行い、1周期後には初期状態に戻ることとする。多リンク機構の推力の基礎式導出には抵抗力推進の理論を用い、回転関節の角速度とトルクも計算した。

4.2 動作生成アルゴリズム

多リンク機構の動作運動生成のアルゴリズムには、Fig.7に示すようなNeural Networkと遺伝的アルゴリズム(GA)を用いる。Neural Networkの入力は規格化時間、出力は各回転関節の角度変化量とする。角度変化量から1周期分の動作を作成、さらにx軸方向の推力および各回転関節にかかるトルクを算出する。

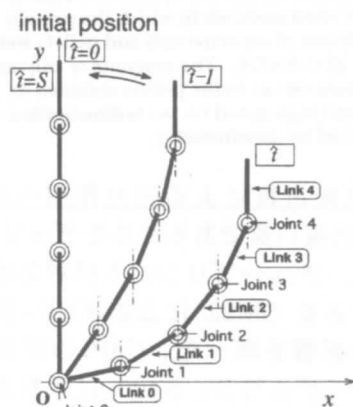


Fig. 6 Multilink mechanism.

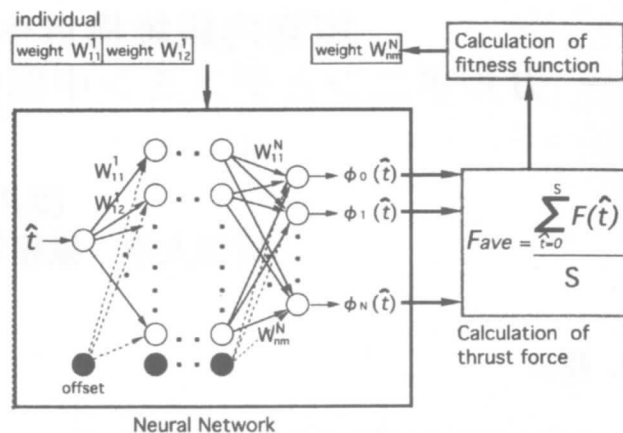


Fig. 7 Schematic diagram of the algorithm

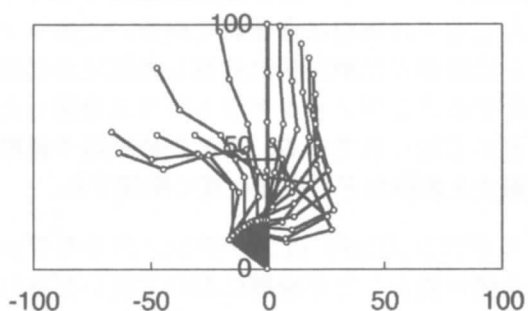


Fig. 8 Motion pattern ($F_{ave} = 30.6 \mu\text{N}$)

GAはNeural Network内のユニット間の重みを個体として表現し、その最適化を行うものである。GAは用意した個体の集団を評価し、より高い適応度を得るように進化させていく。ここでは、最適化をできるだけ推力が高いものとした。そこで適応度はより高いx軸方向の平均推力となる。ただし、回転関節の動作範囲(角速度と負荷トルクの関係)は限られるので、その動作範囲を超えた関節数は適応度を減少させるペナルティ関数として考慮する。

4.3 シミュレーション結果

全長100 μm 、直径0.2 μm の多リンク機構が、周期2sで水中で動作することを想定したシミュレーション結果をFig.8に示す。推進に有益になる部分を有効打、それ以外を回復打とすると、有効打においては移動量の多いリンクの先端側を出来るだけx軸に垂直にすることでx軸方向に推力を得ている。また、回復打においては先端側をx軸に平行に近くすることで負の推力を生じにくくしている。

5. おわりに

人工アクチュエータを試作し、水中で動作させた際の推力特性と、繊毛型の多リンク機構を用いて最適動作を生成するコンピュータシミュレーションについて述べた。今後は人工アクチュエータの屈曲振幅を増加させ、高粘性液体中での推力特性を得る予定である。また、効率が高い動作生成のシミュレーションを行って、人工アクチュエータの自律化に向けて発展させていきたい。