屈曲形水中推進機構における分散制御*

小林 俊一^{*1}, 関 塚 亮^{*2}
奥 西 利 文^{*2}, 森 川 裕 久^{*1}

Disributed Control for Bending Propulsion Mechanism in Water

Shunichi KOBAYASHI, Akira SEKIZUKA,
Toshifumi OKUNISHI and Hirohisa MORIKAWA

This paper describes distributed controls for an ultra-multilink bending propulsion mechanism in water. Functions in neural oscillator of an organism were programmed to each unit that consists of controller and actuator. The bending movement was generated by coordination of each unit. As an experiment of the robustness, we supposed the case of a joint is locked (no rotation). The bending movement was recovered by other joints' cooperation. We discussed influence of movement of the mechanism on thrust force.

Key Words: Distributed Control, Bending Movement, Propulsion, Robustness, Robotics

1. 緒 言

一般に、生物の運動は自律的かつ高機能、高効率であることから、生物の運動機構を規範したロボットの研究は工学的に極めて有意義であると考えられる。ここで、生物の水中運動に関してみると、大体がヒレによる往復運動や体全体を使つての屈曲運動という形態によって実現されている。この観点より著者は水中を屈曲運動によって推進する水ヘビの如き屈曲運動生物に着目し、その屈曲を多リンク機構で再現した、屈曲形水中推進機構を開発した⁽¹⁾。同機構ではリンク間の関節部にあたる多数のモータを1台のパーソナルコンピュータによって集中制御していたが、モータ数の増加によって計算量が増大し、多様な制御が困難となった。このように大規模かつ複雑なシステムにおいて集中制御を行う場合には、速応性・信頼性・耐故障性・柔軟性・拡張性などの重要な性質をもたせることが困難となる。これらの問題を解決する方法として、自律分散システム論がある。自律分散システムでは、個々

の構成要素がそれぞれ独立にある規範に則ってふるまい、しかも全体の調和が保たれ、その目的が有効に達成されなければならない。そのためには分離し、自律的にふるまう各要素が互いに協調する必要がある⁽²⁾。

翻って水中運動生物の遊泳運動に関してみると、その運動制御系は自律分散制御システムの原形ともなりうるものであることが報告されている⁽³⁾。例えばザリガニには腹部に5対の小さな肢(遊泳肢)をもっており、幼生時にはこの5対の肢が後ろから前へ位相をずらしながら往復運動をして泳いでいる。5対の遊泳肢は腹部にある5対の神経節によって制御されていることがわかっており、その各神経節が発振器として働き、ある種の相互作用によって位相関係が調節されていると考えられている。また、ヒルについては垂直方向の体のうねりを頭から尾の方向へ進めることによって動くが、そのためには各体節で位相をずらして背側と腹側を交互に収縮させなければならない。その収縮運動が、腹部神経節に分散された神経発振器系によって制御されていると考えられている。したがって、これらの制御方法は屈曲形水中推進機構にも十分応用できるものである。

多数のアクチュエータを備えた索状型の移動ロボットに関しての分散制御は、例えば広瀬ら⁽⁴⁾や高梨ら⁽⁵⁾

* 原稿受付 1998年2月12日。

^{*1} 正員、信州大学繊維学部(☎386-8567 上田市常田3-15-1)。^{*2} 信州大学大学院。

E-mail: shukoba@gipc.shinshu-u.ac.jp

によって適用されているが、索状形的水中推進機構の分散制御は見当たらない。また、自律分散システムを考慮した水中生物の遊泳波形パターン発生システムは、湯浅・伊藤⁶⁾によって詳細にコンピュータシミュレーションがなされているが、実際にモデルを製作しての実験的研究はないようである。

以上より、本研究では分散制御型の屈曲形水中推進機構を開発し、分散制御について二つの試みを行った。まず、神経発振器系で行われる機能を個々の制御装置に組み込み、神経発信器との相互作用として、位相差を調節するように協調制御を行い、全体の屈曲運動パターンを生成させて推進力特性を検討した。次に耐故障性実験として、任意の関節が故障して固定した場合を想定し、他の関節によってリカバーさせて屈曲運動を形成したときの推進力特性を検討した。

2. 屈曲形水中推進機構とその制御装置

2・1 屈曲形水中推進機構の構成 屈曲形水中推進機構の外観および屈曲部の詳細図を図1と2に、全体のシステム構成を図3に示す。アクチュエータは減速機付ステッピングモータ(以降、モータ)で、その回

Fig. 1 Outlook of bending propulsion mechanism

Fig. 2 Bending mechanism

転運動が軸に固定された下部コネクションボードに伝わり、隣のステッピングモータに固定されている下部コネクションボードとの間に屈曲運動を生じさせる。屈曲形水中推進機構は本体を水中で屈曲運動させるのではなく、下部コネクションボードに取付けたヒレのみを水中で屈曲運動させて推進力を得るため、内部フレームからナイロン糸で吊るされる。屈曲形水中推進機構の内部フレームに対する自由度を上げるため、ナイロン糸にはばねを取付け、ナイロン糸取付部にはベアリングを設ける。なお、屈曲形水中推進機構の全長は960 mmでモータ数は15(リンク数は16)である。

2・2 屈曲形水中推進機構の制御 モータ1個につき1個の制御装置を接続して分散制御を行った。本システムでは制御装置にはZ80をCPUとしたマイクロコンピュータボードを使用した。制御装置とモータの組会せを「ユニット」と呼ぶこととし、15個のユニットを直列に組合せてシステム全体を構成した。各ユニットには先頭から番号をつけ、それぞれ $U_1, U_2, \dots, U_n, \dots, U_{15}$ と呼ぶこととする。各ユニットはそれぞれとなりとのユニットとパラレル I/O での通信で情報交換が可能となっている。

2・3 屈曲形水中推進機構の推進力測定方法 屈曲形水中推進機構の全推進力は、吊り下げられた内部フレームにかかる力を糸でつながれたひずみゲージ式荷重変換器で検出し、コンピュータに取込む。推進力の測定の際は負の推進力を検出できるよう、静止状態においてあらかじめ初期張力を与えておく。

3. 屈曲形水中推進機構の運動パターンの生成

3・1 運動パターンの生成方法 生物の体節に沿って並んだ神経節が発振器として作用して、その位相

Fig. 3 Experimental setup

が頭部から尾部へ向かって少しずつ遅れることにより遊泳パターンを形成するように、各ユニットを発振器として運動させ、先頭から後ろに向かって位相を一定量ずつ遅らせて屈曲運動を実現させる。

各ユニットでは個々の回転速度を変化させて前方のユニットとの位相差を調整できるようにする。そのため、あらかじめ各ユニットにはモータの角度変化が正弦波状になるようなデータをプログラム上にもたせてあり、ユニット間の位相差を変化させるために、高速回転モード、低速回転モード、これらの中間の通常回転モードの3モードを用意する。各ユニットではその位相を確認でき、その位相データを後方のユニットに随時、送信する。そして外部からのトリガをきっかけとして、各ユニット U_n は前方のユニット U_{n-1} より受信した位相データと自らの位相データと比較し、 U_{n-1} との位相差を目標値に近づけるためにモータの回転速度を上げるか下げるかを判断し、前述の3モードのうち最適なものを選択する。この方法により、先頭のユニットの周期を一定とすれば、各ユニット間の位相差がランダムな状態で発振している初期状態から、トリガをきっかけにして、先頭から徐々に屈曲運動を形成していく。最終的に収束した波形は、曲率が体軸に沿って正弦波状に変化する曲線(Serpentoid 曲線⁽⁴⁾)を離散化した形状となる。

初期状態から屈曲運動が形成されるまで、推進力と通常回転モードに収束していないユニットの数 N_a を測定し、 N_a が零となった時点で屈曲運動が収束したものとする。なお、トリガを送信した時間を $t=0$ s とし、高速回転モード、通常回転モード、低速回転モードの周期はそれぞれ 3.13, 6.25, 9.38 s とした。また、屈曲運動の波数を 1 とするために、目標となる位相差を $2\pi/16$ と設定した。これより、収束後の全体の屈曲運動周期は、通常回転モードの周期と同じ 6.25 s となる。

3・2 結果および考察 ランダムな初期形態から屈曲運動が形成されるまでの屈曲運動の形状(屈曲形水中推進機構の中心線のみ)の変化を図4に、時間 t と N_a の関係を図5に示す。

両図の結果はトリガが入力されるときランダムな形状に大きく依存することから、ここでは時間に対する屈曲運動の形成を検討するため、初期状態を既知とし、図4に示すようにトリガが入るまでは屈曲形水中推進機構の形状は直線とさせ、トリガが入力されてから各ユニットが回転運動と位相差の制御を行うようにした。

図5より、トリガが入力された直後の先頭ユニット

Fig. 4 Formation of bending wave

Fig. 5 Change of number of adjustment (fast and slow) mode units

Fig. 6 Change of mean thrust force and thrust force difference

除くすべてのユニットの位相差はすべて零なので、すぐに目標の位相差に調整しようとする。次第に屈曲運動に近づくにつれて、調整のための高速回転・低速回転モードになる頻度が減少し、約 50 秒後には周期的かつ滑らかな屈曲運動に収束する。

図6に時間 t と推進力の関係を示す。なお、推進力は、収束後の屈曲運動周期である 6.25 s ごとにおける推進力の平均値(平均推進力 $\bar{F}$)と推進力の最大値と最小値の差(推進力変動幅 $|F_{\max} - F_{\min}|$)を示している。初期形態は図4, 5と同様、トリガが入るまでは屈曲形水中推進機構の形状を直線とさせた。図6より、 $\bar{F}$ はトリガ入力後はやや減少するが 10 s 付近から増加していき、収束後は 0.15 N 付近でほぼ一定となる。また、 $|F_{\max} - F_{\min}|$ はトリガ入力後に大きく増加するが、次第に減少し、多少の変動は見られるが比較的ほぼ一定の値となる。特に、運動開始時の $\bar{F}$ と $|F_{\max} - F_{\min}|$ の大きな変化は、図4にみられるように、波長と振幅が大きい屈曲波形が一時的に発生するためと考えられる。なお、収束後の推進力の屈曲運動 1 周期における変動は後で示した図9の Normal とほぼ同様であった。

4. 屈曲形水中推進機構の耐故障性

4.1 耐故障性制御方法 一部の関節が故障して固定した場合でも全体の屈曲運動が維持できるような制御を行う。そのため、前に述べた各ユニットを発振器のように制御する方法とは異なる方法をとる。ここでは、Kobayashi ら⁽⁷⁾が行った超多関節マニピュレータの分散制御のアルゴリズムをこの屈曲形水中推進機構に応用する。

各ユニット U_n は、あらかじめ計算された 1 後方のユニット U_{n+1} の目標位置 $\mathbf{p}_{n+1}(t_i) = (p_{n+1,x}, p_{n+1,y})$ をプログラム上にもたせてある。ただし、 t_i は 1 周期中で離散化された時間である。 U_n において、 U_{n+1} の位置 $\mathbf{c}_{n+1} = (c_{n+1,x}, c_{n+1,y})$ が、常にその目標位置 $\mathbf{p}_{n+1}(t_i)$ に追従するように動作することによって、屈曲運動が形成される。目標への到達は修正回数 k とすると、次式で示すことができる。

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{c}_{n+1}(k) = \mathbf{p}_{n+1}(t_i) \quad \dots\dots\dots (1)$$

現実には $\mathbf{c}_{n+1}$ の調整は、 $t_{i+1} - t_i$ の時間内でしか行

なえないので、確実に一致させることはできないが、常に各ユニットは目標位置に近づくように運動することになる。

図7に屈曲形水中推進機構の座標系を示す。同図より、先頭のリンクを x 軸上にあるとして、その先端を原点としたときのユニット U_{n+1} の座標位置 $\mathbf{c}_{n+1}$ は次式によって表される。

$$\begin{cases} c_{n+1,x}(k) = c_{n,x}(k) + L \cos \sum_{s=1}^n \theta_s(k) \\ c_{n+1,y}(k) = c_{n,y}(k) + L \sin \sum_{s=1}^n \theta_s(k) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$\begin{cases} c_{1,x}(k) = L \\ c_{1,y}(k) = 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 L はリンク長、 θ_s は S 番めのユニットの相対角を表す。 U_n は前方のユニットから U_n の座標と相対角の総和を通信により得て、1 後方ユニット U_{n+1} の位置を式(2)より独自に計算する。その結果を用いて、 U_{n+1} の位置 $\mathbf{c}_{n+1}$ を目標位置 $\mathbf{p}_{n+1}$ へ到達させるための制御則は次式となる。

$$\begin{aligned} a_n(k) = & -d \cdot \text{sgn}[\{p_{n+1,x}(k) - c_{n+1,x}(k)\} \\ & \times \{c_{n+1,y}(k) - c_{n,y}(k)\} - \{p_{n+1,y}(k) \\ & - c_{n+1,y}(k)\} \{c_{n+1,x}(k) - c_{n,x}(k)\}] \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\theta_n(k+1) = \theta_n(k) + a_n(k) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $a_n(k)$ はモータの回転角度で、その符号が回転方向を表す、 d は微小な正の角度で、ここではステッピングモータの 1 ステップ角に相当する。この制御則により、ある一つのユニットの関節が故障した場合でも、その制御装置の計算と通信が機能していれば、その後方での関節が目標位置に近づくため、結果的に図8に示すように屈曲形水中推進機構が大体の屈曲運動を維持することができ、システム全体の耐故障性が高まる。なお、この耐故障性を個々のユニットにもたせないで、任意の 1 ユニットの固定した場合の比較実験は、屈曲波形が大きく崩れ、ある特定のユニットに大きなトルクが生じてモータの脱調現象が生じてしまうので行わないこととした。

4.2 結果および考察 本研究では故障を想定し、ソフトウェアによって任意の 1 ユニットの関節を固定させ、その関節の位置と固定時の回転角度に対する推

Fig. 7 Coordinate system of bending propulsion mechanism

Fig. 8 Restoration of wave form

Fig. 9 Change of thrust force in one cycle

Fig. 10 Relationships between position of fixed unit and mean thrust force

進力の影響について調べた。屈曲波数は1とし、屈曲運動の周期を6.82 sとした。

図9に固定したユニットがない正常な場合(Normal)と4番めまたは12番めを固定し、その角度 θ_F を0 degとしたときの屈曲運動1周期における推進力の変化を示す。これより、特に固定したユニットが先頭に近い $U_F=4$ の場合は、周期の前半において推進力の増減が大きい。

図10に屈曲運動1周期における平均推進力 $\bar{F}$ と固定したユニットの位置(ユニット番号 U_F)の関係を示す。固定した場合は正常な場合よりも平均推進力が約半分に低下する。特に、固定したユニットが先頭の $U_F=1$ の場合は、固定角度 θ_F に対して平均推進力が大きく影響される。

図11に屈曲運動1周期における推進力変動幅 $|F_{\max}-F_{\min}|$ と固定したユニットの位置(ユニット番号 U_F)の関係を示す。これより、固定したユニットが進行方向の後半にある場合は、推進力変動幅が正常な場合とあまり変わらない。しかし、固定したユニットが進行方向の前半にある場合は推進力変動幅が大きく、固定角度 θ_F に対しても大きく影響されることがいえる。

以上より、故障を想定して固定したユニットがある

Fig. 11 Relationships between position of fixed unit and thrust force difference

場合は、正常な場合よりも平均推進力は低下するが正の推進力を得ることができ、推進力変動幅は増加するが後方で固定した場合にはあまり変化のないことが確認できた。このことから、この分散制御は耐故障性の機能を有しているといえる。なお、先頭に近いユニットにおいて推進力の変動が大きい理由は、常に目的位置に近づけるために大きな調整を行うユニットが増加し、その大きな調整のために滑らかに屈曲しないためと考えられる。

5. 結 言

水中を推進する生物の屈曲運動を多リンク機構で再現した分散制御形の屈曲形水中推進機構を開発し、分散制御について二つの試みを行った。これより、以下のことが明らかとなった。

(1) 神経発振器系で行われる機能を個々の制御装置に組み込み、神経発信器との相互作用として位相差を調節するように協調制御を行った。これより、全体の屈曲運動パターンを自ら生成し、安定した推進力特性を得ることができた。

(2) 耐故障性実験として、任意の関節が故障して固定した場合を想定し、他の関節によってリカバーさせて屈曲運動を形成した。これより、故障のない正常な場合と比べ、平均推進力は低下するが正の推進力を得ること、推進力変動幅は増加するが後方で固定した場合にはあまり変化のないことを確認した。

なお、今後の課題として以下の事項が挙げられる。

(1) 個々のユニットの推力とその垂直方向力、モータにかかるトルクの計測。

(2) 推進効率の定義とその評価。

(3) 一部の関節が故障して固定した場合、水中推進に影響をおよぼさない運動の自己生成による耐故障性の向上。

文 献

- (1) 小林俊一, 屈曲運動生物を模倣した水中推進機構の推進力特性, 機論, **60**-579, B(1994), 3613-3617.
- (2) 長田正, 自律分散をめざすロボットシステム, (1995), 1-15, オーム社.
- (3) 鈴木良次, 生体における分散と協調, 計測と制御, **26**-1, (1987), 78-81.
- (4) 広瀬茂男, 生物機械工学, (1987), 113-116, 工業調査会.
- (5) 高梨信彰, 完全モジュラー型関節の開発と超多自由度ロボット「おろち」への適用, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1995), 499-500.
- (6) 湯浅秀男・伊藤正美, 自律分散システムの協調と大域的秩序形成, 計測と制御, **29**-10, (1990), 929-934.
- (7) Kobayashi, H., Shimemura, E. and Suzuki, K., An Ultra-Multi Link Manipulator, *IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS'91*, (1991), 173-178.