

[研究助成 (A)]

非線形同期を使った群ロッド移動システムの研究

—— ウニの移動方法に学ぶ ——

Study of group rod migration system using nonlinear synchronization

—— Learning from the migration method of sea urchins ——

2191020



研究代表者

東京海洋大学 学術研究院
海洋電子機械工学部門

教授 田原 淳一郎

[研究の目的]

本研究は非線形同期を用いて、ウニのトゲによる運動を使った、移動システムの研究である。非線形同期はきわめて強い同期特性を持つため通常の制御に見られるモデル誤差等を考慮する必要がなく、個々のアクチュエータ等の誤差や個性があっても同期する点が斬新である。このことは生物では良く見られる現象であり、例としてホタルの同期発光現象や脳のシナプスの同期システム・ネットワーク構成にLIF (Leaky Integrate-and-Fire) が挙げられる。一方でVDP (van der Pol oscillator) は2次の非線形微分方程式であり多様な形の同期を取ることが可能である。そこで、我々はVDPを用いてウニのロッド運動を生成し、移動体を構成する事にした。

この時、アクチュエータとして、非線形性やモデル誤差の大きいエアシリンダを採用した。その理由として水中での使用を考えた時、水圧・空気圧を使った物であれば、信号伝達と動力源を併用可能との考えに至ったためである。しかし、水圧・空気圧を使う場合、連続量を扱うサーボバルブは非常に高価であり多リンクシステムである本ロボットではコスト的に採用出来ないという事となった。そのため、コストが安い、電磁弁のON/OFF信号でVDP非線形

同期が実現出来るかという事を再度調査した。

結果として、エアシリンダをデルタ型に構成しVDPを用いて多様な同期パターンの生成とパターンの移行を確認する事が出来た。

[研究の内容, 成果]

1 非線形同期システム

本研究においては制御対象をエアシリンダとした。エアシリンダを3本使ってデルタ構造とする。非線形同期の発振タイプとしてVDPを採用した。VDPを採用する理由として、同期するパターンがLIF発振子の場合には時定数 τ が小さい発振子にのみ同期するためである。一方でVDPは基本式に入力を加える事でVDP発振子の同期パターン(同周期・同位相/逆位相)を生成する事が可能である。そのため、VDP方式を採用した。

将来において多数のシリンダーデルタ構造で多面体や平面を構成するとき、多数の制御弁が必要になる。そこでコストの問題を考えると制御弁は高価なサーボバルブではなく安価な電磁弁(ON/OFF弁)で構成する必要がある。

本研究で採用したVDP発振子は通常であれば、接続された振動子の情報を連続的に入力する必要がある。しかしON/OFF弁を使用して動作させるためには入力をパルス型にする必要

がある。そこで、VDP を用いた非線形同期手法を調査し、室蘭工業大学の梶原秀一准教授の発案されたパルス入力型の VDP 同期システムを採用することとした (式 1)。これにより、連続した入力ではなく ON/OFF 信号を使う事で VDP の同期が出来る事が予想された。

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 0) \\ -1 & (x < 0) \end{cases}$$

$$\ddot{x}_i - \varepsilon(1 - x_i^2)x_i + \omega^2 x_i + K_m \sum_{j=1}^2 \{\text{sgn}(x_j) - \text{sgn}(x_i)\} + K_f \{\text{sgn}(x_1) - \text{sgn}(x_2)\}$$

式 (1)

ただし、電気と違い、圧力伝達では sgn 関数に遅れや欠損が出る可能性があり、これについて調査を行った。パルス信号の遅れを表現するために素子間に距離があると考えシミュレーションを実施した。多様な結合の場合について考察を行った。結果、図 1 の様に非同期の状態が発生する構造があることが問題となったが、VDP がデルタ上に配置された形であれば安定して同期する事が理解できた。そのため、エアシリンダも同様にデルタ形状の配置のみを考えて進めていくこととした。これにより、多様な運動が創発するアクチュエータ・移動体としての活用が期待できると考えられる。

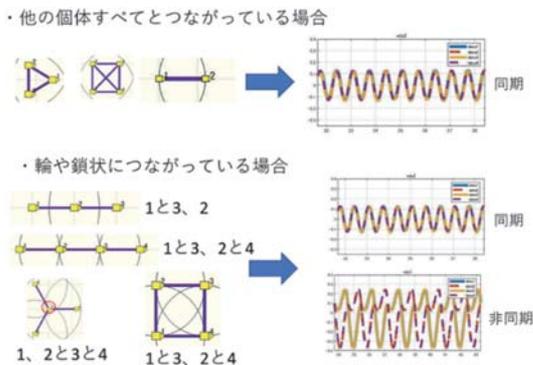


図 1 発振子の配置と同期

2 エアシリンダモデルにおける VDP モデル

ここで、エアシリンダを電磁弁で VDP による同期を行うモデルを式 (2) に示す。

$$\ddot{x}_n - \varepsilon_n(1 - x_n^2)\dot{x}_n + \omega_n^2 x_n + K_{m_n} u_{np} = 0$$

式 (2)

VDP モデルの制御入力 $K_{m_n} u_{np}$ の u_{np} は外部からの入力で同期モードの制御を行う項である。シリンダは常に VDP に支配された動作を行う。このとき、VDP は零和モード、同相モードを持つ。ここでの零和とはそれぞれの振動子の変位 (x_n) の和が 0 に近づくような同期方法である。具体的には 3 相交流のようなそれぞれの波の位相が等しくずれているような同期のことである。

零和モード

ここで VDP 振動子を式 (3) と表現する。

このとき、シリンダの長さに注目すると x_n x_i の符号でシリンダは正の時に膨張し、負の時に収縮する形となる。これを零和モードにする。応答としては図 2 となる。

零和モード ($p=0$)

$$u_{n0} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^N (\text{sgn}(x_n(t)) - \text{sgn}(x_i(t)))$$

式 (3)

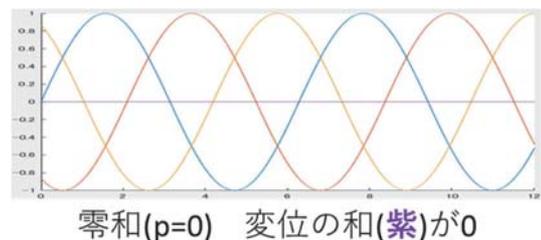


図 2 零和モードの各振動子の変位

同相モード

一方で、式 (4) と表現した場合、シリンダの伸縮速度に注目すると ($\dot{x}_n(t) - \dot{x}_n(t-1)$),

$(x_i(t) - x_i(t-1))$ の符号がシリンダの伸縮を行うと同相モードとなる。図3の様な応答を取る形になる。

同相モード ($p=1$)

$$u_{n1} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^N (\text{sgn}(x_n(t) - x_n(t-1)) - \text{sgn}(x_i(t) - x_i(t-1)))$$

式 (4)

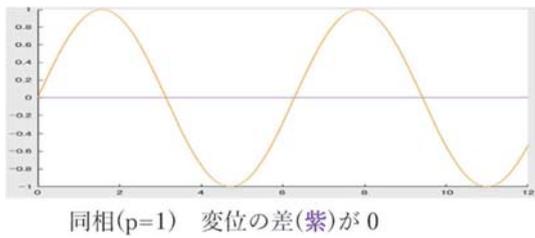


図3 同相モードの各振動子の変位

よって、デルタ型に組んだエアシリンダは、零和モードのときは「回転運動」を行う。モータの様な一方に回転するアクチュエータとして活用出来る。また、同相モードの時は「伸縮運動」を行うため、ポンプの様な動作が可能になる。これらの2つの異なった運動を単純なVDPモデルだけで実施出来る点が大きな特徴

となる。VDPで2つの異なった運動を創発させる事が可能になる事が重要である。

同期のモード変換

デルタ接続されたシリンダを、零和モードと同相モードの変換を自在に変える事により多様な運動を実施する事が出来る。そのため、モード変更が可能かどうかを調査した。このときVDPの振動子のパラメータ ϵ_n , ω_n の値に10%程度の誤差を持たせた。

この理由としてVDPはモデル誤差があっても同期が可能な事を確認するためである。実際のエアシリンダ実験装置においてもモデル誤差があるため、それを加えた形でシミュレーションを行った。

その結果、同期モードを任意に操作できることが確認できた。また、同期モードによって周期と振幅が変わる結果となった。なお、同相モード：周期：3.38[s] 振幅：1.2[-]、零和モード：周期：2.20[s] 振幅：0.8[-] となっており、モード変換は良好に行えていることが理解出来る（図4）。

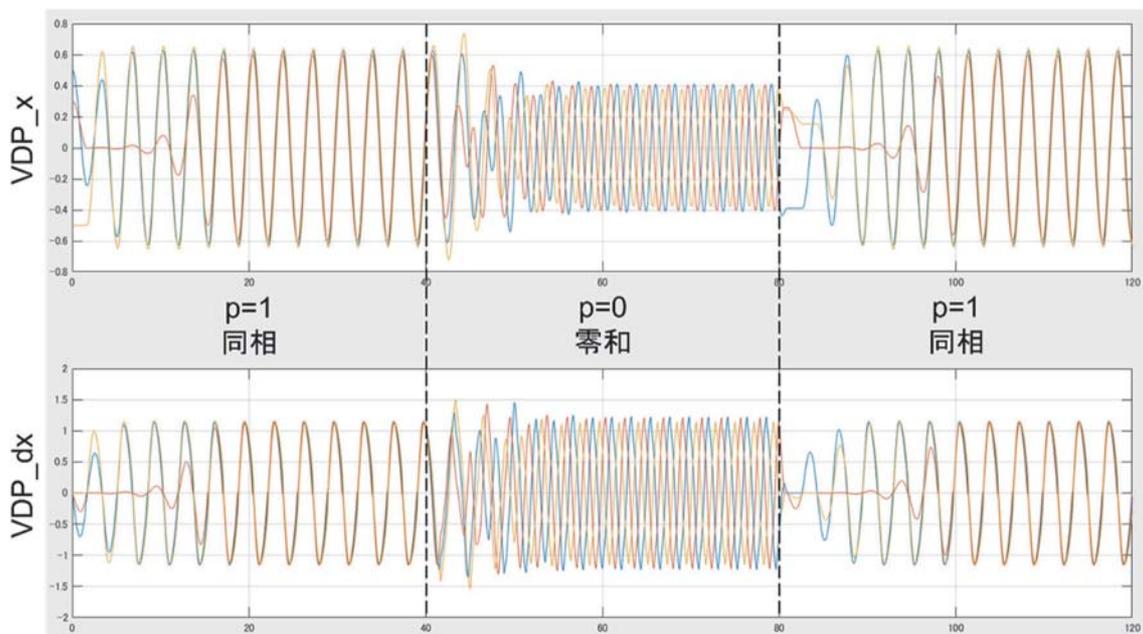


図4 VDPの零和・同相モード変換

3 エアシリンダーシステム

提案した VDP によるデルタ形状のエアシリンダーシステムのシステム概略図を図 5 に示す。エアコンプレッサを用いて圧縮空気をソレノイドバルブに分配する。各シリンダの VDP の計算は RaspberryPi Pico を使った自作制御ボード (図 6) 上で行う。計算結果に応じてバルブの ON/OFF 制御を行い、シリンダの伸縮を制御するシステムになっている。

デルタ形状に組んだエアシリンダは図 7 のよ

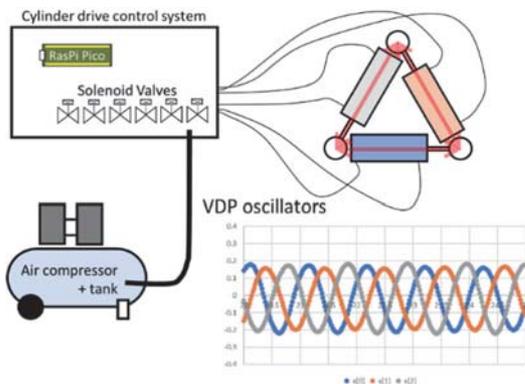


図 5 エアシリンダーシステム概略図



図 6 VDP 計算及び電磁弁制御回路



図 7 デルタ構造のエアシリンダとセンサ

うに構成され干渉が発生しないようにジグを作成し接続している。またリニアセンサも接続され、シリンダの伸縮 (0~150 mm) を計測可能にしている。

4 エアシリンダの特性

エアシリンダに圧縮空気を入れる事で伸縮を実施する。まず、VDP に制御入力を入れず自由発振させる。VDP の外部入力なしの時に VDP 振動子の x の正負を電磁弁の入力としたときのグラフを図 8 に示す。

このとき、リニアセンサの値は、VDP 振動子の x とほぼ同じ動きをする。つまり、リニアセンサの値 L を VDP 振動子の入力 x の代わりとする。これにより式 (3), (4) を変形すると式 (5) が成り立つ。なお、 L はシリンダロッドの長さを示し、0~150[mm] までの値をとる。

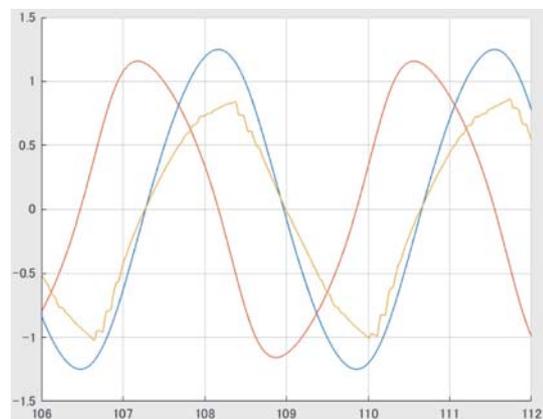
零和

$$u_{n0} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^N (\text{sgn}(L_n(t) - 75) - \text{sgn}(L_i(t) - 75))$$

同相

$$u_{n1} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^N (\text{sgn}(L_n(t) - L_n(t-1)) - \text{sgn}(L_i(t) - L_i(t-1)))$$

式 (5)



(青: x , 橙: dx/dt , 黄: リニアセンサ値)

図 8 VDP の応答とリニアセンサ値の調査

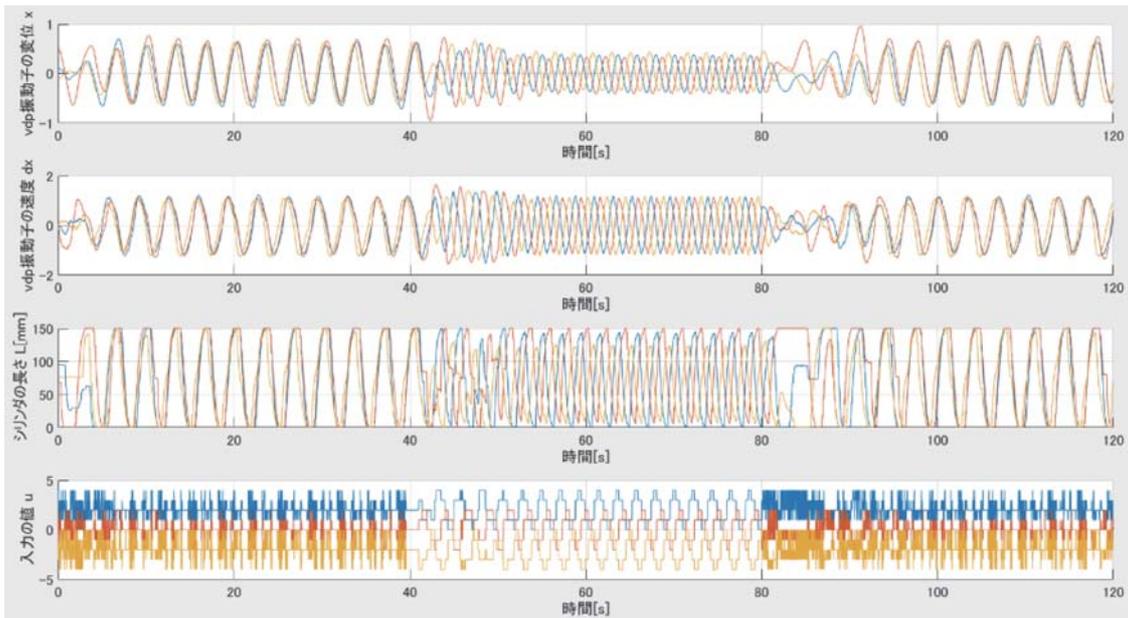


図9 実験結果

5 実験結果

デルタ接続されたシリンダを零和モードと同相モードに変更する実験を実施した。結果、シミュレーションと同様にVDPにより創発されたシリンダ運動を確認する事ができた。なお、同相モード：周期：3.342[s] 零和モード：周期：2.15[s] となっており、モードは良好に変化した（図9）。

6 成果

VDPによりエアシリンダーを同相・零和モードで動作させ、さらにモード移行も可能になった。モデル誤差があるシリンダと空気圧システムにおいてもシミュレーションと同様に動作する事を確認した。最も単純なデルタ構造のみの試験であったが、多面体へ拡張することが可能であることもシミュレーションでは確認出来ている。

[今後の研究の方向, 課題]

デルタ結合のモジュールを立体的にくみ上げて行く事により任意の形状に変化させる事が可能になればウニロボットシステムが構築可能となり、さらには多様な多面体の構造を持つ移動体ロボットが実現可能であると考えられる。現在、本デルタ構造のエアシリンダモデルを複数結合させた実験装置を構築し、立体構造での動作検証を計画している。

[成果の発表, 論文等]

- ・ 小野聡太郎, 田原淳一郎, 小池雅和, 加藤哲 (東京海洋大学), 梶原秀一 (室蘭工業大学), パルス結合型 van der Pol 方程式を用いた移動ロボットのシミュレーション, 第8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2021年3月1日~4日, P4, 3E2-3.