



## 4結合van der Pol方程式の同期パターンを利用した4足歩行ロボッ トの歩行制御

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 日本機械学会 公開日: 2019-11-12 キーワード (Ja): キーワード (En): van der Pol equation, four-legged robot, walking pattern generation 作成者: 合田, 浩章, 梶原, 秀一 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/00010039">http://hdl.handle.net/10258/00010039</a>

# 4 結合 van der Pol 方程式の同期パターンを利用した 4 足歩行ロボットの歩行制御 —目標パターンへの追従特性—

Walking pattern control for four-legged walking robot  
using synchronization pattern of four-coupled van der Pol equations  
—Tracking characteristic to target phase patterns—

○合田浩章 (室蘭工大)      正 梶原秀一 (室蘭工大)

Hiroaki Gouda, Muroran Inst. Tech.

Hidekazu Kajiwara, Muroran Inst. Tech.

In our previous work, we proposed a walking pattern generation method of a four-legged robot using four-coupled van der Pol (VDP) equations. We use VDP equation as a nonlinear oscillator to generate a walking pattern of the robot. When several equations are coupled mutually, they influence each other and their periodic solutions synchronize. Our walking pattern generation method can control forward and turning motions of a four-legged robot by changing a phase difference pattern between VDP equations. In this study, we describe the numerical simulation result that analyzed tracking characteristic to a target pattern of a phase difference pattern in each case of all or serial coupled VDP equations.

**Key Words:** van der Pol equation, four-legged robot, walking pattern generation

## 1 はじめに

非線形振動子である van der Pol(VDP) 方程式は初期値に依存せず一定の振幅で振動する振動子である。VDP 方程式を相互に結合すると、互いに干渉しあってさまざまなパターンで同期する。4 つの VDP 方程式を結合して得られた周期解の同期パターンを利用すると、多足歩行ロボットの歩行パターンを生成することが可能である [1]。また障害物からの距離に応じて歩行パターンを変化させることにより、ロボットの障害物回避動作などが可能である [2]。本研究では 4 結合 VDP 方程式の同期パターンを利用して歩行ロボットの歩行パターンを生成する際、目標パターンへの追従特性についてシミュレーションにより調べた結果について述べる。

## 2 4 結合 VDP 方程式の周期解を用いた歩行パターン生成

ここでは 4 結合 VDP 方程式の周期解を利用して 4 足歩行ロボットの歩行パターンを生成する方法について述べる [1]。4 本の VDP 方程式をすべて以下のように相互に結合すると、任意の方程式間の位相を  $\phi_{ij}$  だけずらして同期させることができる。このとき各 VDP 方程式は図 1 のように結合されており、このときの結合方式を全結合と呼んでいる。

$$\ddot{x}_i - \varepsilon(1 - \dot{x}_i^2)\dot{x}_i + \omega_0^2 x_i + K_m \left( \sum_{j=1}^4 X_{ji} - X_{ii} \right) + K_f \left( 3X_{i1} - \sum_{j=2}^4 X_{ji} \right) = 0 \quad (1)$$

$$X_{ij} = x_i \cos \phi_{ij} + \frac{K'_{AGi}}{K_{AGi}} \dot{x}_i \sin \phi_{ij} \quad (2)$$

$$\phi_{ij} = -\phi_{ji} \quad (3)$$

$$\phi_{41} = -(\phi_{12} + \phi_{23} + \phi_{34}) \quad (4)$$

$$(i = 1 \sim 4, j = 1 \sim 4, i \neq j, X_{ii} = x_i)$$

式 (1) で 4 つの VDP 方程式は結合パラメータ  $K_m$  によりすべて相互に結合されており、 $K_f$  の項は各方程式の周期解を同期させ

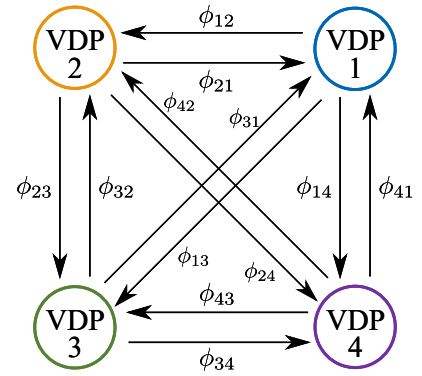


Fig.1: VDP coupling(All coupling)

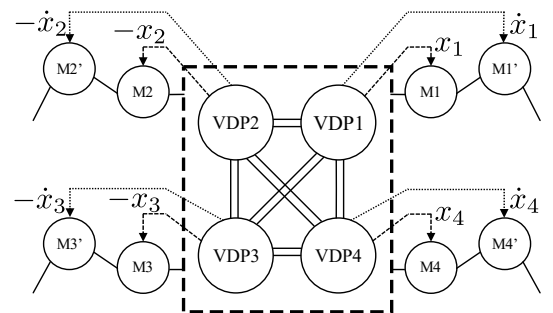


Fig.2: Signal overview

るための誘導項である。  $K_{AGi}$ ,  $K'_{AG1}$  は  $x_i$ ,  $\dot{x}_i$  の振幅を 1 にするオートゲインコントロールのゲインである。式 (2) のように  $X_{ij}$  を構成すると、 $x_i$ ,  $x_j$  間の位相を  $\phi_{ij}$  だけずらすことができる。 $\phi_{12}$ ,  $\phi_{23}$ ,  $\phi_{34}$  は任意の値を指定でき、それ以外は式 (3)(4) から求めることができる。ロボットには図 2 に示すように VDP 方程式の周期解を各モータの指令値として与える。いま目標位相を  $\Delta\phi$  とし、 $\phi_{12} = \Delta\phi$ ,  $\phi_{41} = -(\Delta\phi + \pi)$  [rad] としたとき、図 3(c) に示すように  $\Delta\phi$  を変化させることでロボットを右旋回、図 3(a)

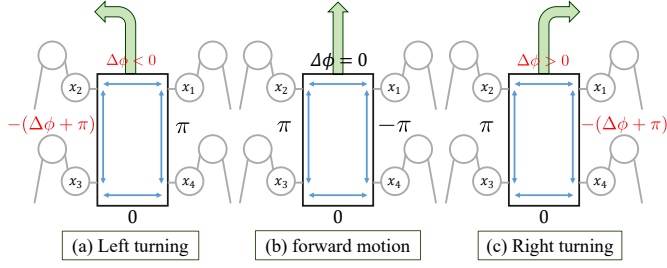


Fig.3: Walking pattern

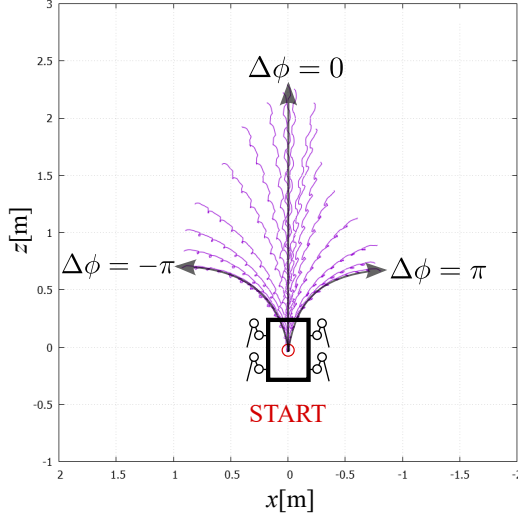


Fig.4: Walking trajectories of four-legged robot

に示すように  $\phi_{23} = -(\Delta\phi + \pi)$  とすることでロボットを左旋回させることができる。このとき、図4に示すように  $\Delta\phi$  の大きさによりロボットの旋回角を制御できる。図4より、 $\Delta\phi$  の値によってロボットの旋回半径を決めることができ、 $\Delta\phi$  を  $0 < |\Delta\phi| \leq \pi$  の範囲で大きくするほどロボットの旋回半径を小さくできることがわかる。

### 3 目標パターンに対する追従特性

図3において目標位相  $\Delta\phi$  を時間的に変化させる場合、その変化が速すぎると各 VDP 方程式間の位相が  $\Delta\phi$  に追従しなくなり適切な歩行パターンが生成できなくなる可能性がある。そこで、ここでは  $\Delta\phi$  を変化させたときの歩行パターンの追従特性について調べる。本研究では図3において各周期解間に与えるすべての目標位相を総称して目標パターンと呼ぶことにする。いま、目標パターンを以下のように変化させる場合を考える。

$$\left. \begin{aligned} \phi_{12} &= \Delta\phi = A \sin(2\pi ft) \\ \phi_{23} &= \pi, \phi_{34} = 0, \phi_{41} = -(\Delta\phi + \pi) \quad (\Delta\phi \geq 0) \\ \phi_{23} &= -(\Delta\phi + \pi), \phi_{34} = 0, \phi_{41} = \pi \quad (\Delta\phi < 0) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

VDP 方程式のパラメータを  $\varepsilon = 1.0$ ,  $\omega_0 = 2\pi$ ,  $K_m = K_f = 30$ , とし、 $A = \pi$ ,  $f = 0.1[\text{Hz}]$  とした結果を図5に示す。また  $A = \pi$ ,  $f = 0.3[\text{Hz}]$  とした結果を図6に示す。なお10[s]までの間は  $\Delta\phi = 0$ ,  $\phi_{23} = 0$ ,  $\phi_{34} = 0$ ,  $\phi_{41} = -\pi$  と設定している。図5より、 $f$  が低い場合には目標パターンに追従するが、図6のように  $f$  が高くなると追従しなくなることがわかる。

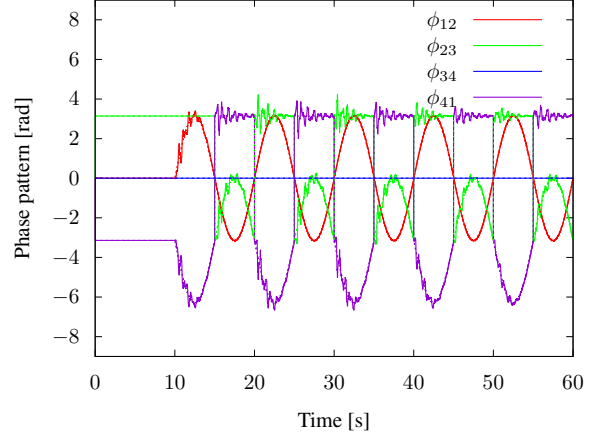


Fig.5: Phase relationship at  $f = 0.1[\text{Hz}]$

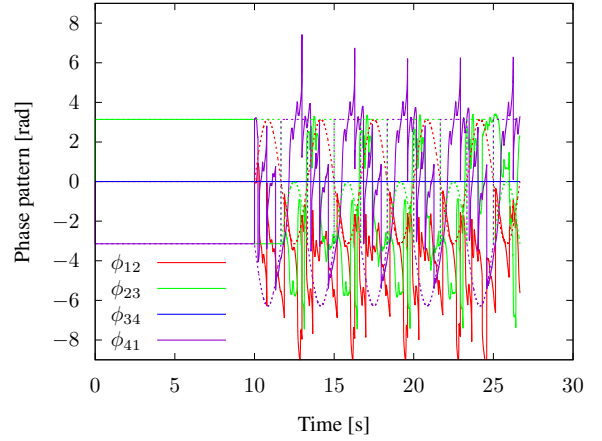


Fig.6: Phase relationship at  $f = 0.3[\text{Hz}]$

本研究では、図5に示すように目標パターンを5周期変化させた時の目標パターンと実際の位相パターンの二乗積分誤差を計算し、この誤差が一定値以下となる最大の周波数を最大追従周波数  $f_{max}$  としている。なお誤差が設定した値に満たない場合は誤差が最大となる周波数を  $f_{max}$  としている。

$A = \pi$  とし、 $K_f$  を変化させた際の  $f_{max}$  を計算した結果を図7に示す。図7より、 $K_m$  の値が大きいかほど  $f_{max}$  の値が大きくなり、追従特性が向上することがわかる。また  $K_m$  の値が同じ場合には  $K_f$  の値が大きいかほど追従特性が向上する傾向にあることがわかる。同様に  $K_m$  を変化させた際の  $f_{max}$  を計算した結果を図8に示す。図8より、 $K_f$  の値によらず  $K_m$  の値が大きくなるほど追従特性が向上することがわかる。図7、図8のどちらの場合にも、 $K_m$  と  $K_f$  が近い値であるときに追従特性が向上することがわかる。また、 $K_m = K_f$  とし、 $A$  を変化させた際の  $f_{max}$  を計算した結果を図9に示す。図9より、 $A$  の大きさが同じであれば、 $K_m$ ,  $K_f$  が大きくなるほど  $f_{max}$  が大きくなることがわかる。 $A$  が小さいときには  $f_{max}$  は大きく変化しないが、 $K_m = K_f = 5$  においては  $A = 0.5$  付近より  $A$  に応じて  $f_{max}$  が減少していくことがわかる。これは  $K_m$ ,  $K_f$  の値が大きくなっても同様の傾向にあり、 $A$  がある値よりも大きくなったとき  $A$  に応じて  $f_{max}$  が減少していくことがわかる。

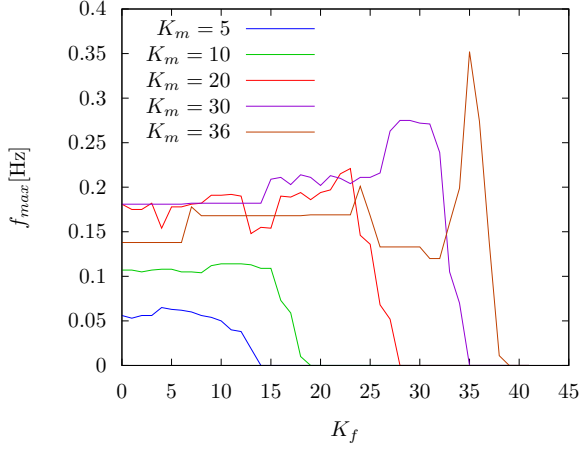


Fig.7:  $f_{max} - K_f$  characteristics in all coupling

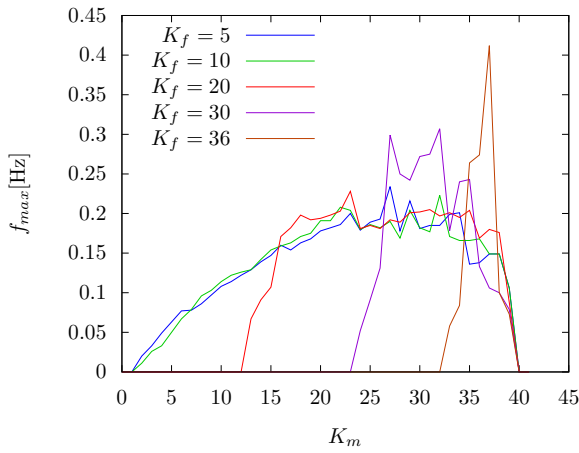


Fig.8:  $f_{max} - K_m$  characteristics in all coupling

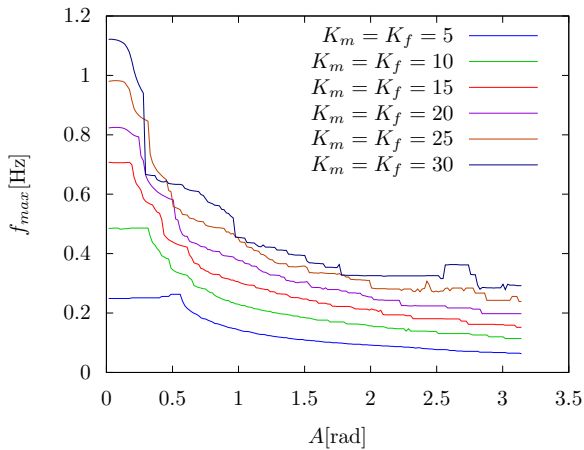


Fig.9:  $f_{max} - A$  characteristics in all coupling

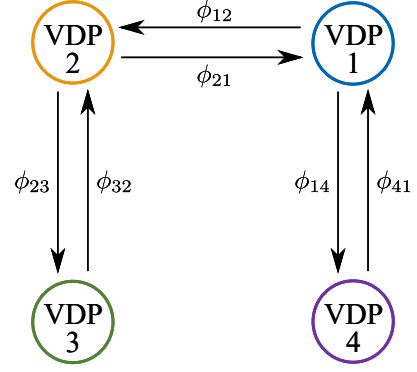


Fig.10: VDP coupling(Serial coupling)

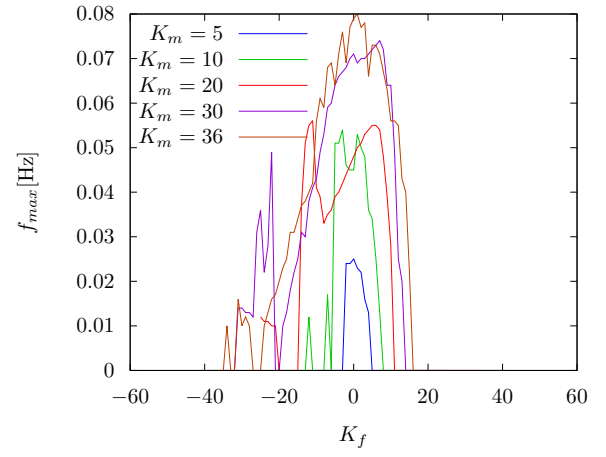


Fig.11:  $f_{max} - K_f$  characteristics in serial coupling

#### 4 直列結合 VDP 方程式の目標パターンに対する追従特性

前章では全結合 VDP 方程式の目標パターンへの追従特性について述べた．ここでは図 10 に示すように VDP 方程式を直列結合した場合の追従特性について調べた結果について述べる．

4 直列結合 VDP 方程式を以下に示す．

$$\begin{aligned}
 \ddot{x}_1 - \varepsilon(1 - \dot{x}_1^2)\dot{x}_1 + \omega_0^2 x_1 + K_m(2x_1 - X_{21} - X_{41}) \\
 + K_f(x_1 - X_{21}) &= 0 \\
 \ddot{x}_2 - \varepsilon(1 - \dot{x}_2^2)\dot{x}_2 + \omega_0^2 x_2 + K_m(2x_2 - X_{32} - X_{12}) \\
 + K_f(x_1 - X_{21}) &= 0 \\
 \ddot{x}_3 - \varepsilon(1 - \dot{x}_3^2)\dot{x}_3 + \omega_0^2 x_3 + K_m(x_3 - X_{23}) \\
 + K_f(x_1 - X_{21}) &= 0 \\
 \ddot{x}_4 - \varepsilon(1 - \dot{x}_4^2)\dot{x}_4 + \omega_0^2 x_4 + K_m(x_4 - X_{14}) \\
 + K_f(x_1 - X_{21}) &= 0
 \end{aligned} \tag{6}$$

3 章と同じ条件を用いて，位相パターンの追従特性を調べる． $A = \pi$  とし， $K_f$  を変化させた際の  $f_{max}$  を計算した結果を図 11 に示す．図 11 より， $K_m$  の値が大きくなるほど  $f_{max}$  が大きくなることがわかる．しかしながら図 7 と異なり， $|K_f|$  が小さいとき  $f_{max}$  が大きくなる傾向にあることがわかる．同様に  $K_m$  を変化させた際の  $f_{max}$  を計算した結果を図 12 に示す．図 12 より， $|K_f| \ll K_m$  のとき  $f_{max}$  が大きくなることがわかる．また  $|K_f|$  が大きい場合， $f_{max}$  が小さくなる傾向にあることがわかる．ただし図 12 における  $K_f = -20$  のグラフにおける  $K_m = 26$  の点の

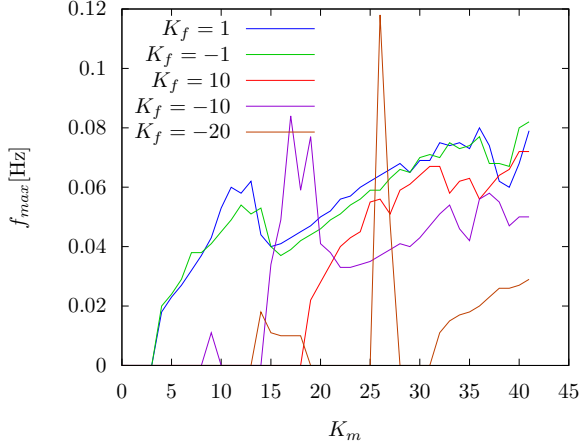


Fig.12:  $f_{max} - K_m$  characteristics in serial coupling

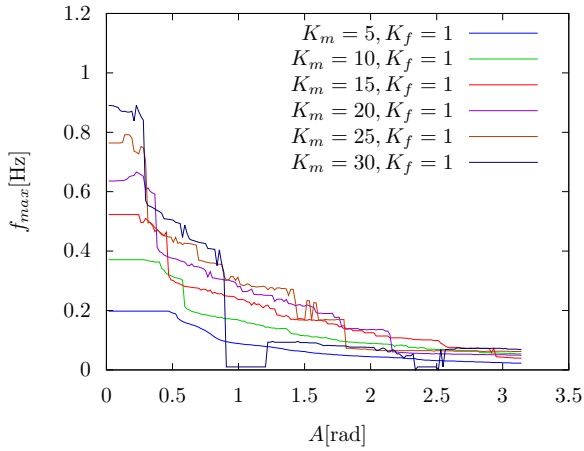


Fig.13:  $f_{max} - A$  characteristics in serial coupling

ように、 $|K_f|$  の値が大きくても  $f_{max}$  の値が大きくなる点も存在する。

以上の結果から、直列結合においては  $K_m$  に対して  $f_{max}$  が最大となる最適な  $K_f$  の値が存在するということがわかる。また、 $K_f = 1$  とし、 $K_m = 5, 10, 15, 20, 25, 30$  のとき振幅  $A$  を変化させた結果を図 13 に示す。図 13 より、 $K_m = 5$  のとき、 $A = 0.5$  辺りまで  $f_{max}$  の値は変化しない。その後  $A$  の値が大きくなるほど  $f_{max}$  の値が小さくなることがわかる。また  $K_m = 10, 15$  においては  $0.4 < A < 0.6$  の範囲で  $f_{max}$  の値が大きく下がり、その後はほぼ一定の傾きとなっていることがわかる。 $K_m = 20$  においてはおよそ  $K_m = 10, 15$  のときと同様の傾向にあるが、 $A = 2.1$  付近において  $f_{max}$  の値が再び大きく下がることわかった。以上の結果より、直列結合の場合においても  $A$  の値が小さいほど  $f_{max}$  の値が大きくなることわける。

次に全結合、直列結合それぞれの場合について  $f_{max}$  が最大になる条件を求めた結果について述べる。全結合において  $A = \pi$  とし  $0 \leq K_m \leq 36$ ,  $0 \leq K_f \leq K_m + 5$  の範囲で  $f_{max}$  が最大となる点を探索した結果、 $K_m = K_f = 32 \sim 33$  のとき  $f_{max} = 0.399[\text{Hz}]$  となった。直列結合では  $A = \pi$ ,  $0 \leq K_m \leq 36$ ,  $K_m - 5 \leq K_f \leq K_m + 5$  の範囲を調べた結果、 $K_m = 26$ ,  $K_f = -20$  のとき  $f_{max} = 0.118[\text{Hz}]$  となった。以上の解析より、 $f_{max}$  は直列結合よりも全結合の方が大きくなり、追従特性が良いことがわかった。また全結合では  $K_m$  と  $K_f$  の値が近い場合に  $f_{max}$  の値が大きくなるパラメータが存在し、直列結合の場合は、 $|K_f| \ll K_m$

のときに  $f_{max}$  の値が大きくなるパラメータが存在することがわかった。

## 5 おわりに

本研究では、4 結合 VDP 方程式の周期解を利用して 4 足歩行ロボットの歩行パターンを生成するとき、VDP 方程式のパラメータにより追従特性がどのように変化するか調べた。結果として VDP 方程式の結合方式により追従特性が異なること、追従特性が向上する最適なパラメータが存在することが明らかになった。今後はパラメータ最適化の効果を実機により検証したいと考えている。

## 参考文献

- [1] 佐藤, 梶原, 青柳, 花島: 4 結合 VDP 方程式を用いた 4 足歩行ロボットの歩容制御, 第 17 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2016), pp.1549-1552(2016)
- [2] 合田, 梶原: 4 結合 van der Pol 方程式を利用した 4 足歩行ロボットの歩行制御-実機による検証-, 第 50 回測自動制御学会北海道支部学術講演会 (2018)