



結合パラメータ励振系の相互引き込み現象と同期パターン制御

メタデータ	<p>言語: Japanese</p> <p>出版者: 日本機械学会</p> <p>公開日: 2019-11-12</p> <p>キーワード (Ja):</p> <p>キーワード (En): Parameter excitation system, Mutual entrainment, Synchronization</p> <p>作成者: 稲川, 正義, 梶原, 秀一</p> <p>メールアドレス:</p> <p>所属:</p>
URL	http://hdl.handle.net/10258/00010038

結合パラメータ励振系の相互引き込み現象と同期パターン制御

Mutual entrainment and synchronization pattern control of coupled parametric excitation system

○稲川正義 (室蘭工大) 正 梶原秀一 (室蘭工大)

Masayoshi Inagawa, Muroran Inst. Tech.

Hidekazu Kajiwara, Muroran Inst. Tech.

Mutual entrainment phenomenon is also called synchronization phenomenon, if various synchronization patterns of mutual entrainment can be controlled freely, it is considered to be applicable to vibration control of multiple degrees of freedom system. In our previous work, we showed that the energy of a swing system can be controlled by periodic input control method, and that forced entrainment occurs in the system. In this paper, we describe the result that analyzed by simulation and experiment whether mutual entrainment occurs when two swing systems are coupled mutually and show that periodic motions of the coupled swing system are controllable by our synchronization pattern guide control method.

Key Words: Parameter excitation system, Mutual entrainment, Synchronization

1 はじめに

引き込み現象は同期現象とも呼ばれ、固有周期の異なる複数の振動子が相互作用により同期する相互引き込み現象と振動子に周期外力を加えたとき振動子の周期が外力の周期に同期する強制引き込み現象がある。周期入力制御法によりエネルギー制御されたシステム (周期入力制御系) を相互に結合すると、引き込み現象が生じ、様々なパターンで同期する [1]。この同期パターンを制御出来れば、多自由度系の振動制御などに応用できると考えられる。これまで我々は、パラメータ励振系であるブランコに対し周期入力制御を適用し、エネルギー制御が可能なことや強制引き込み現象が起こることを示してきた [2]。本研究では、パラメータ励振系を複数結合した結合パラメータ励振系において相互引き込み現象が起きるか、また同期パターンを制御できるかどうかをシミュレーションで解析し、さらに実機を用いて検証した結果を述べる。

2 ブランコのモデルとダイナミクス

本研究ではブランコのモデルとして図 1 に示すような支点から重心までの距離が時間的に変化する振子を考える。図 1 のように座標系を設定し、パラメータを以下のように定義する。

- l : 振子の長さ [m]
- θ : 振子の振れ角 [rad]
- m : 振子の質量 [Kg]
- g : 重力加速度 [m/s²]

この時、ブランコの運動方程式は式 (1) のようになる。なお、添字 i は i 番目のブランコを表している。

$$\ddot{\theta}_i + 2\frac{\dot{\ell}_i}{\ell_i}\dot{\theta}_i + \frac{g}{\ell_i}\sin\theta_i = 0 \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

3 周期入力制御法によるパラメータ励振系の制御

ここで支点から重心までの距離を以下のように変化させることを考える。

$$\ell_i = \ell_{0i} - \alpha_i \quad (\ell_{0i} > 0, |\alpha_i| \ll 1) \quad (2)$$

$$\alpha_i = \beta_i K_{AG_i} x_i K'_{AG_i} \dot{x}_i \quad (3)$$

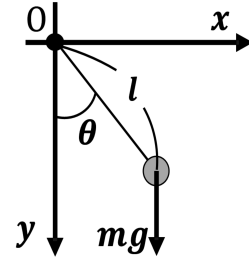


Fig.1: Swing system and its coordinates

$$\beta_i = K_p(E_d - E_i^*) \quad (4)$$

$$E_i = \frac{1}{2}m\ell_0^2\dot{\theta}_i^2 \quad (5)$$

上式において K_p は比例ゲインであり、 E_d は目標エネルギー、 E_i はブランコの運動エネルギー、 E_i^* は運動エネルギーの平均値である。 K_{AG_i}, K'_{AG_i} 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、 x_i, \dot{x}_i は以下の van der Pol(VDP) 方程式の周期解である。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i - \varepsilon(1 - x_i^2)\dot{x}_i + \Omega_i^2 x_i &= K_g \dot{\theta}_i \\ &+ K_m \left(\sum_{j=1}^2 x_j - x_i \right) + \tau_i \end{aligned} \quad (6)$$

$K_m = 0, \tau_i = 0$ の時ブランコのエネルギーを制御することが出来る。相互結合時のブロック図を図 2 に示す。 $K_m \neq 0$ のとき各ブランコは VDP 方程式を通じて相互に結合されている。 τ_i は同期パターン誘導項で以下のように表される。

$$\tau_1 = -K_{f1}(x_1 - x_2) - K_{f2}(x_1 + x_2) \quad (7)$$

$$\tau_2 = -K_{f1}(x_1 - x_2) + K_{f2}(x_1 + x_2) \quad (8)$$

$K_{f1} \neq 0, K_{f2} = 0$ のときは、同相のとき $\tau_i = 0$ 、同相以外のとき $\tau_i \neq 0$ となり、ブランコの周期運動は同相に誘導される。逆に $K_{f1} = 0, K_{f2} \neq 0$ のときは、逆相のとき $\tau_i = 0$ 、逆相以外のときは $\tau_i \neq 0$ となり、周期運動は逆相に誘導される。

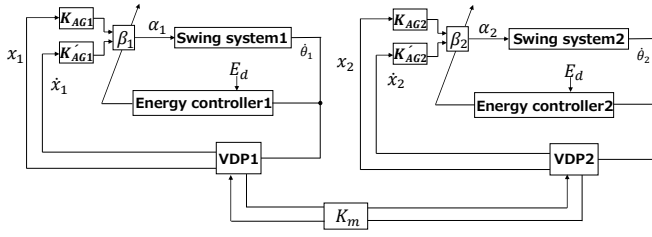


Fig.2: Block diagram of mutual entrainment

Table 1: Parameters of the swing

$m=0.186$	$l_{01}=l_{02}=0.0651$	$K_p=20$
$\varepsilon=1.3$	$\Omega_1=\Omega_2=12.3$	$E_d=0.03$

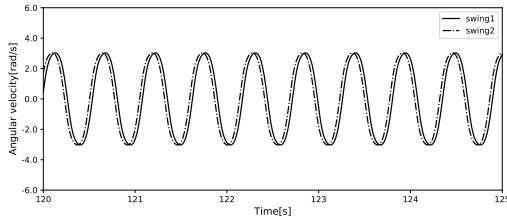


Fig.3: No coupled parametric excitation system

4 シミュレーション

ブランコおよび制御系のパラメータを表 1 に示す。ブランコの初期条件を $\theta_1(0)=0.1$, $\theta_2(0)=0.2$, $\dot{\theta}_1(0)=\dot{\theta}_2(0)=0$, $K_m=0$ とし、シミュレーションした場合の定常状態を図 3 に示す。ブランコは初期位相を保ったまま振れていることがわかる。図 3 と同じ初期条件で $K_m=20$, $K_{f1}=K_{f2}=0$ とした場合を図 4 に、 $K_m=-20$, $K_{f1}=K_{f2}=0$ とした場合を図 5 に示す。図より K_m の値によって同期パターンを切り換えられることがわかる。

次に誘導項の効果を調べた結果について述べる。図 6 に $K_m=20$, $K_{f1}=K_{f2}=0$ として逆相モードにした後、 $t=40[s]$ に K_m のみ変化させた場合 ($K_m=-30$) を示す。図より逆相モードから同相モードに切り換わらないことが分かる。図 7 に同じ条件で $t=40[s]$ に $K_m=-30$, $K_{f1}=20$ とした場合を示す。誘導項により逆相から同相に切り換わることがわかる。以上の結果によりブランコの周期運動が過渡状態の場合は結合項により同期パターンを制御出来ること、定常状態になった場合は結合項と同期パターン誘導項により同期パターンを制御できることがわかる。次に、ブランコの長さが異なる場合でも相互引き込み現象が起きるかシミュレーションした結果を図 8,9 に示す。図の結果は 2 つのブランコの長さを $l_{01}=0.0651[m]$, $l_{02}=0.0660[m]$ と設定し、相互結合前 ($K_m=0$) と相互結合後の ($K_m=20$) ブランコの振れを FFT 解析したものである。図より結合前はそれぞれのブランコの周波数は $1.827[Hz]$ と $1.835[Hz]$ であり相互結合前では周波数のピークがずれていることがわかる。また、図より結合後はともに周波数は $1.895[Hz]$ となり相互引き込み現象が起きて同期していることがわかる。

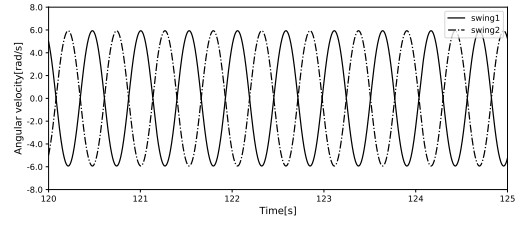


Fig.4: Anti-phase mode of mutual entrainment

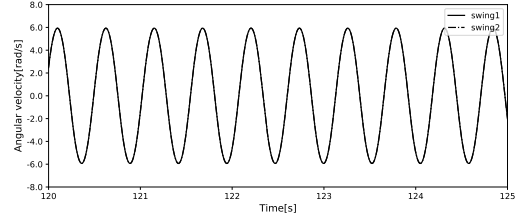
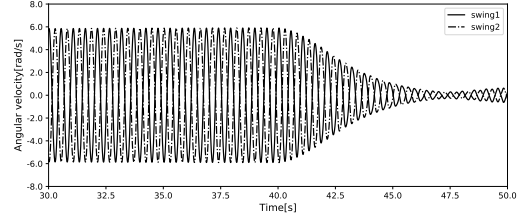
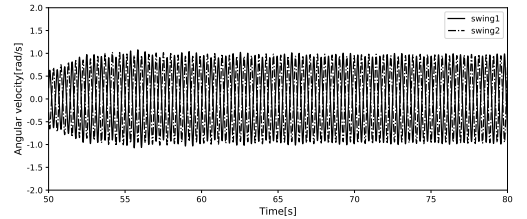


Fig.5: In-phase mode of mutual entrainment

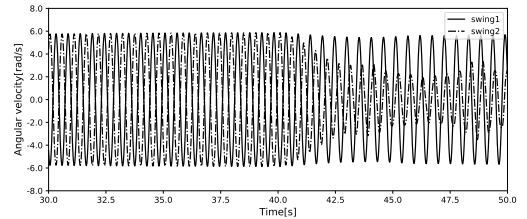


(a):30-50[s]

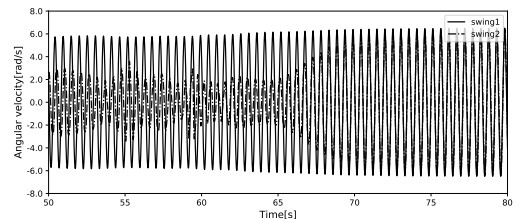


(b):50-80[s]

Fig.6: Synchronization control(use only K_m)



(a):30-50[s]



(b)50-80[s]

Fig.7: Synchronization control from anti-phase mode to in-phase mode

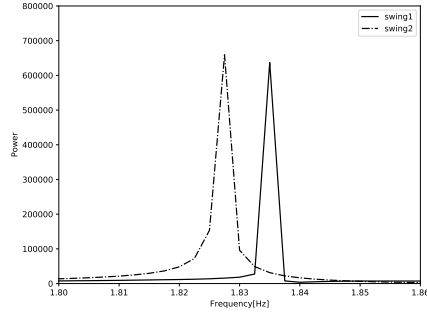


Fig.8: FFT analysis of no coupled parametric excitation system

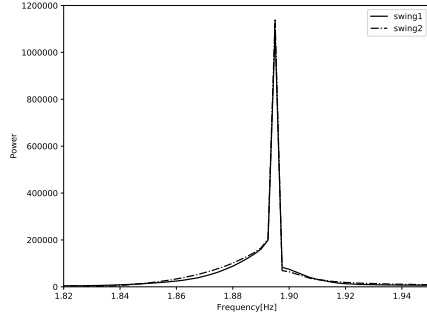


Fig.9: FFT analysis of coupled parametric excitation system

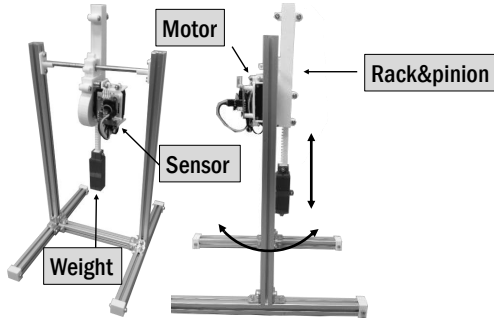


Fig.10: Swing robot system

Table 2: Parameters of the swing robot system

$m=0.186$	$l_{01}=l_{02}=0.0651$	$K_p=40$
$\varepsilon=1.3$	$\Omega_1=\Omega_2=8.6$	$E_d=0.03$

5 実験

5.1 ブランコロボットの構成

相互引き込み現象が起きるかどうか、また同期パターンを制御出来るかどうかを確認するために実機を製作して検証した結果を以下に述べる。図 10 に製作したブランコロボット、表 2 にロボットのパラメータと制御パラメータを示す。ブランコの支点部にはサーボモータが取り付けられており、このモータが回転することでラックアンドピニオンに動力が伝わり、重心位置が変化する。制御器にはシグナルプロセッサを使用し制御周期は 1[msec] で行った。ブランコの周期運動は支点部に取り付けたジャイロセンサにより計測し制御器に入力される。制御器では VDP 方程式の周期解と制御入力を計算し、サーボモータへ指令値を出力している。

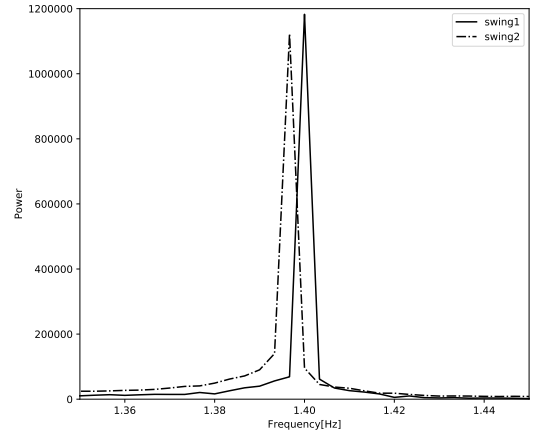
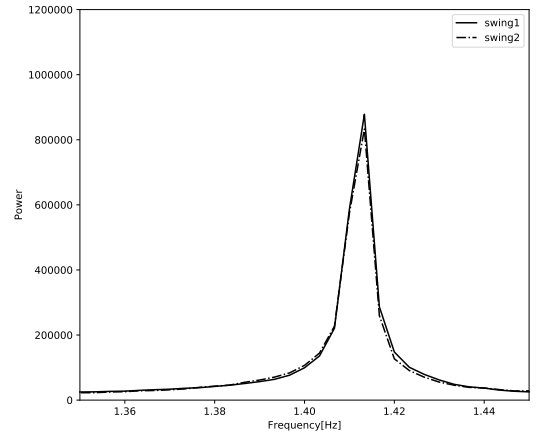
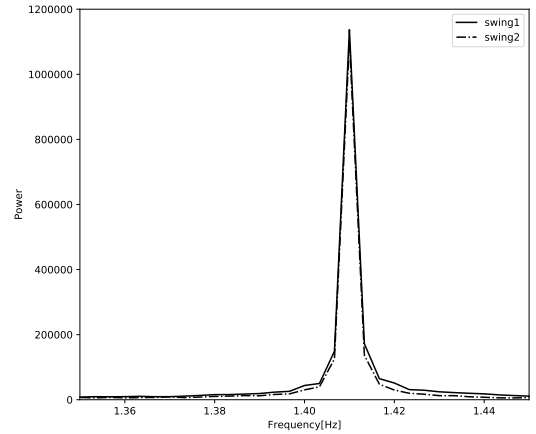


Fig.11: FFT analysis of no coupled parametric excitation system in the actual machine



(a): $K_m=35$

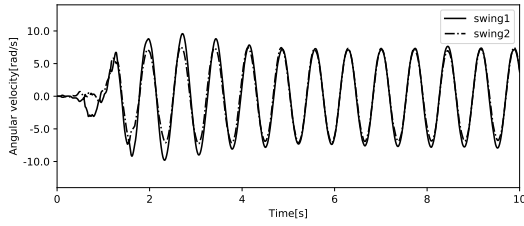


(b): $K_m=-35$

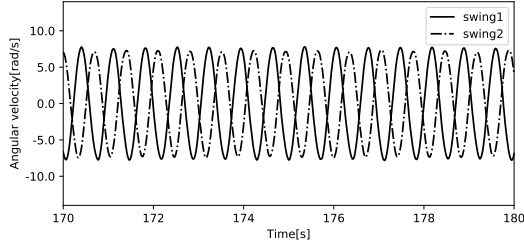
Fig.12: FFT analysis of coupled parametric excitation system in the actual machine

5.2 結合パラメータ励振系の相互引き込み現象

図 11 に $K_m=K_{f1}=K_{f2}=0$ としてブランコを制御した時の FFT 解析結果を示す。各ブランコの発振周波数は 1.40[Hz], 1.39[Hz] となっておりわずかに異なっていることがわかる。次に $K_m=35$ として振らせた場合と $K_m=-35$ として振らせた場合の FFT 解析結果を図 12 に示す。図より結合させた場合には相互引き込み現象が起きて同期していることがわかる。

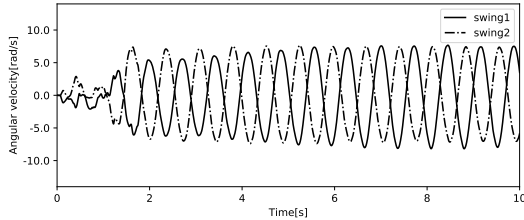


(a):0-10[s]

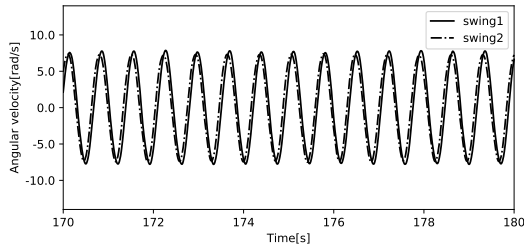


(b):170-180[s]

Fig.13: Anti-phase mode of mutual entrainment in the actual machine



(a):0-10[s]



(b):170-180[s]

Fig.14: In-phase mode of mutual entrainment in the actual machine

図 13 に $K_m=35$ としほぼ同相の初期条件を与えて実験した結果を示す。0-10[s] では同相であるが、定常状態では逆相となっていることがわかる。逆に $K_m=-35$ とし、ほぼ逆相の初期条件を与えた結果を図 14 に示す。図より逆相から同相に移り変わっていくことがわかる。

5.3 同期パターン誘導項による同期パターン制御

ここでは定常状態から同期パターンを制御出来るかどうか実験した結果について述べる。図 15 に $K_m=35, K_{f1}=K_{f2}=0$ として逆相にした後、 $t=40[s]$ で $K_m=-35$ とした場合を示す。この場合は同相にならないことがわかる。

次に図 15 と同じ条件で逆相にした後、 $t=40[s]$ で $K_m=-35, K_{f1}=35, K_{f2}=0$ とした場合を示す。図より同相に誘導されることがわかる。逆に同相の定常状態から $t=40[s]$ で逆相に誘導した結果を図 17 に示す。制御パラメータは同相 ($K_m=-35, K_{f1}=0, K_{f2}=0$), 逆相 ($K_m=35, K_{f1}=0, K_{f2}=35$) である。この場合も同相から逆相に切り替えられることがわかる。

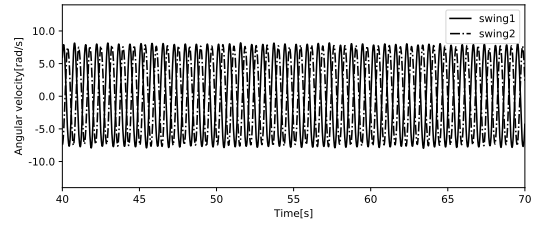


Fig.15: Synchronization control (use only K_m) in the actual machine

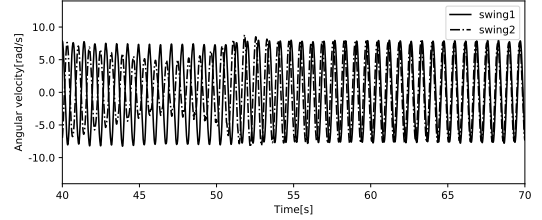


Fig.16: Synchronization control from anti-phase mode to in-phase mode in the actual machine

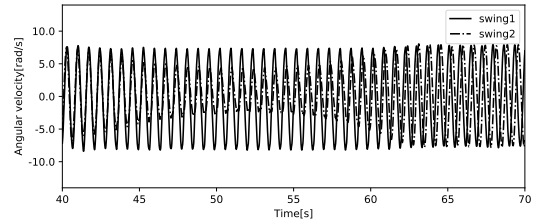


Fig.17: Synchronization control from in-phase mode to anti-phase mode in the actual machine

6 おわりに

本研究では、パラメータ励振系としてブランコを取り上げ、周期入力制御法により制御されたブランコシステムを相互に結合すると相互引き込み現象が起きるかどうか、また同期パターンの制御が可能かシミュレーションと実機により検証した。今後はさらに3台以上のパラメータ励振系の検討を行っていきたい。

参考文献

- [1] 磯嶋、梶原、花島、青柳: 任意の形状で相互結合した周期入力制御系の同期制御 第60回自動制御連合講演会講演論文集, pp.620-623(2017)
- [2] 日西、梶原、青柳、花島: 周期入力制御によるパラメータ励振系のエネルギー制御と強制引き込み現象—実機による検証—, 第17回システムインテグレーション部門講演会, pp.1864-1867