学術・技術論文

鉄棒ロボットの数理解析と運動制御

梶原秀一[*1] 橋本幸男[*2] 松田敏彦[*2] 土谷武士[*3]

Mathematical Analysis and Motion Control for Horizontal Bar Gymnastic Robot

Hidekazu Kajiwara[*1], Yukio Hashimoto[*2], Toshihiko Matsuda[*2] *and* Takeshi Tsuchiya[*3]

This paper discusses a motion control of horizontal bar gymnast robot with two links and one passive joint on the bar. First, we show that the amplitude of the swing of the first link increases with resonance and parametric excitation by swinging the second link periodically. Next, we propose the control method using entrainment to produce each excitation by swinging the second link 'in phase' with the motion of the first link. In our method, the control input is consisted of periodic solution of van der Pol's equation inputted the angular velocity of the first link. Finally, we present experimental results that swing-up control and continuous giant swings can be realized in the real robot.

Key Words: Gymnast Robot, Resonance, Parametric Excitation, Entrainment, Van der Pol's Equation

1. はじめに

メカニカルシステムに周期的な入力を加えることにより，制御目的を達成できる場合がある．これまでに筆者らはこのようなシステムとして，皿まわしやブランコの制御を取り上げてきた [1] [2]．文献 [1] では竿のたわみも考慮した数理モデルにより，安定に皿を回すことができるタイミングが存在することを示し，竿の固有周期以上で竿を振るだけで，竿を振る周期と皿の回転周期が同期し，皿まわしが実現できることを明らかにした．文献 [2] ではブランコを大域的に制御できるタイミングとして，ブランコの振れと重心移動を 1：2 の割合で同期させるとよいことを示し，van der Pol 方程式にブランコの角速度を入力し，その周期解で構成される制御入力によりブランコの振れを制御する方法を提案した．このように，制御対象にタイミングよく周期的な入力を加えたとき，システムをうまく制御できる場合がある．本研究では，第 1 関節を非駆動とする 2 リンクの鉄棒ロボットにおいて，非駆動関節の運動に合わせてタイミングよく駆動関節を動かすことによりその運動を制御できると考え，鉄棒ロボットの数理解析と制御方法の検討を行った．

制御のデモンストレーションや器械体操における運動の解明を目的として，鉄棒ロボットが研究されてきた．これまでに，静止状態からの振り上げ倒立や 1 回転にいたるまでの運動を実現するために数多くの制御方法が提案されている [3]～[6]．従来の研究ではこのような運動を実現するために，全体の運動をシミュレーションで確認しながら試行錯誤的に制御入力を決定していた．そのため，実際にロボットを制御するとき，パラメータ同定誤差や外乱など影響により制御誤差が生じると，その運動が制御できなくなる場合がある．駆動関節を制御するタイミングを各関節の状態量をもとにリアルタイムで変更することで上記の問題は解決できると考えられるが，このような制御方法はこれまで検討されていない．また，鉄棒ロボットを動作させるとき，まず最初に非駆動関節である第 1 関節の運動を励起する必要があるが，この運動が実現できる数理的なメカニズムについてもあまり議論されていないように思われる．

本論文ではまず，鉄棒ロボットにおいて第 2 関節を周期的に駆動したとき，第 1 関節の運動を励起できるタイミングをシステムのエネルギー変化率から解析する．結果として，静止した状態からの振り始めでは共振現象，振れが大きくなった場合はパラメータ共振現象を起こすタイミングで第 2 関節を動作させることにより，効率よく第 1 関節の運動を励起できることを示す．その後，上記のタイミングで第 1 関節と第 2 関節を同期させ続けるために，van der Pol 方程式の入力として第 1 関節の角速度を加え，その周期解で構成される制御入力により第 2 関節を制御する方法を提案する．実際に鉄棒ロボットを製作し提案した制御方法の検証を行った結果，第 1 関節の振れを励起させて連続的にロボットを回転させる制御が可能であった．

2. 鉄棒ロボットのモデルとダイナミクス

本研究では鉄棒ロボットを力学的に扱うモデルとして **Fig. 1** に示すような 2 重振り子を考える．このモデルにおいて **Table 1**

原稿受付 1998 年 4 月 3 日
*1 釧路工業高等専門学校
*2 室蘭工業大学
*3 北海道大学大学院工学研究科
*1 Kushiro National College of Technology
*2 Muroran Institute of Technology
*3 Graduate School of Engineering, Hokkaido University

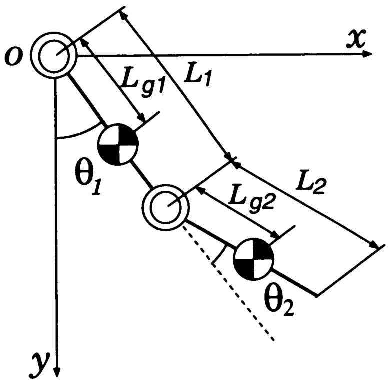


Fig. 1 Two–Link model of horizontal bar gymnastic robot

Table 1 Parameters of gymnastic robot

Parameter	1st Link	2nd Link
Mass [kg]	m_1	m_2
Length [m]	L_1	L_2
Center of Mass [m]	L_{g1}	L_{g2}
Moment of Inertia [N · m^2]	J_{g1}	J_{g2}

に示す記号を定義する．

以上の条件のもとにシステムの運動エネルギー T，ポテンシャルエネルギー U を求めると次式のように表される．

$$T = \frac{1}{2}J_1\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}J_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2L_1L_{g2}\dot{\theta}_1(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\cos\theta_2 \tag{1}$$

$$U = -(m_1L_{g1} + m_2L_1)g\cos\theta_1 - m_2L_{g2}g\cos(\theta_1 + \theta_2) \tag{2}$$

$$J_1 = J_{g1} + m_1L_{g1}^2 + m_2L_1^2$$

$$J_2 = J_{g2} + m_2L_{g2}^2$$

式（1）（2）をラグランジュの運動方程式に代入して鉄棒ロボットの運動方程式を求めると次式となる．

$$\boldsymbol{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{P} + \boldsymbol{G} = \boldsymbol{\tau} \tag{3}$$

ただし，

$$\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{12} & J_{22} \end{bmatrix}, \boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix}, \boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_2 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$J_{11} = J_1 + J_2 + 2m_2L_1L_{g2}\cos\theta_2$$

$$J_{12} = J_2 + m_2L_1L_{g2}\cos\theta_2$$

$$J_{22} = J_2$$

$$P_1 = -m_2L_1L_{g2}\dot{\theta}_2(\dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_1)\sin\theta_2$$

$$P_2 = m_2L_1L_{g2}\dot{\theta}_1^2\sin\theta_2$$

$$G_1 = (m_1L_{g1} + m_2L_1)g\sin\theta_1 + m_2\mathrm{L}_{g2}g\sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$G_2 = m_2L_{g2}g\sin(\theta_1 + \theta_2)$$

3. 鉄棒ロボットの運動解析

本章では鉄棒ロボットの運動を制御できるタイミングを解析するため，鉄棒ロボットの全エネルギーを時間について微分したエネルギー変化率から解析する．

鉄棒ロボットの全エネルギーは式（1）（2）より

$$E = T + U \tag{4}$$

となる．式（4）を時間について微分し，式（3）を考慮して整理すると次式のエネルギー変化率が得られる．

$$\frac{dE}{dt} = m_2L_1L_{g2}\dot{\theta}_1^2\dot{\theta}_2\sin\theta_2 + J_2(\ddot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2\ddot{\theta}_2) + m_2L_1L_{g2}\ddot{\theta}_1\dot{\theta}_2\cos\theta_2 - D_1\dot{\theta}_1^2 + m_2L_{g2}g\dot{\theta}_2\sin(\theta_1 + \theta_2) \tag{5}$$

第2リンクの運動 θ_2 を時間的に変化させたときのエネルギー変化率を式（5）から求めるためには，第1リンクの運動 θ_1 の運動を式（3）から求める必要がある．しかし，式（3）は非線形な微分方程式のため厳密に解を求めることは難しい．そこで，以下では鉄棒ロボットの運動状態に適応した近似を導入することにより解析を進める．

(i) 第1，第2リンクの運動が微小 $|\theta_1|, |\theta_2| \ll 1$ な場合．

上記の条件のもとで，ある1周期中の第1リンクの運動が

$$\theta_1 = \alpha\sin(\omega t) \tag{6}$$

で表されるとき，第2リンクを第1リンクと同期させて次式のように動かす場合を考える．

$$\theta_2 = \beta\sin(\omega t + \phi) \tag{7}$$

このとき，

$$\sin(\theta_1 + \theta_2) \approx \theta_1 + \theta_2 \tag{8}$$

と近似して，式（6）（7）（8），および式（6）（7）を時間について微分したものを式（5）に代入し，1周期 $\frac{2\pi}{\omega}$ について平均をとると，エネルギー変化率の平均は次式となる．

$$\left\langle \frac{dE}{dt} \right\rangle = \frac{\alpha\beta\omega}{2}[A_1\alpha\beta\sin(2\phi) + A_2\sin\phi] - \frac{D_1\omega^2}{2}\alpha^2 \tag{9}$$

$$A_1 = \frac{m_2L_1L_{g2}\omega^2}{4}$$

$$A_2 = (J_2 + m_2L_1L_{g2})\omega^2 - m_2L_{g2}g$$

上式より，鉄棒ロボットが静止した状態からリンクを振り出す場合は，第1リンクの振れが非常に小さいとして

$$A_2 \gg A_1\alpha\beta \tag{10}$$

ただし，$A_2 > 0$ とする

が成り立つとき，$\phi = \frac{\pi}{2}$ のとき，エネルギー変化率が最大になることが分かる．

また，第2リンクを動かす周期 ω は次のようにして求められる．

鉄棒ロボットの運動方程式 (3) をリンクの振れ角 θ_1, θ_2 が微小であるとして線形近似すると次式となる.

$$\ddot{\theta}_1 + 2\gamma\dot{\theta}_1 + \omega_k^2\theta_1 = -B_1\ddot{\theta}_2 - B_2\theta_2 \tag{11}$$

ただし,

$$JJ = J_1 + J_2 + 2m_2L_1L_{g2}$$
$$\omega_k = \sqrt{\frac{(m_1L_{g1} + m_2L_1 + m_2L_{g2})g}{JJ}}, \gamma = \frac{D_1}{2JJ}$$
$$B_1 = \frac{J_2 + m_2L_1L_{g2}}{JJ}, B_2 = \frac{m_2L_{g2}g}{JJ}$$

式 (6) (7), ならびにそれらを時間について微分したものを鉄棒ロボットの運動方程式 (11) に代入して整理すると, 位相 ϕ について次の関係を得る.

$$\tan\phi = \frac{2\gamma\omega}{\omega_k^2 - \omega^2} \tag{12}$$

上式より, $\phi = \frac{\pi}{2}$ で第1リンクと第2リンクを同期させるとき, その周期 ω は

$$\omega \approx \omega_k \tag{13}$$

となる. したがって, 静止した状態から鉄棒ロボットを動作させる場合, その固有周期で第2リンクを動かすことにより, 共振現象を利用して第1リンクの振れを励振させるとよいことが分かる.

(ii) 振れが増加して $|\theta_1| \gg |\theta_2|$ となった場合.

ただし, $|\theta_2| \ll 1$ とする.

ここでは, 振れが増加して第1リンクの振れが第2リンクに比べて非常に大きくなった場合を考える.

このとき2リンクの鉄棒ロボットの運動を **Fig. 2** に示すように, 鉄棒ロボットのすべての質量が重心 G に集中した1リンクの振り子の運動として近似する.

よって, 1周期中の振り子の運動が次式で表されるとすると

$$\ddot{\theta}_1 = -\frac{g}{\ell_G}\sin\theta_1 \tag{14}$$

ℓ_G は重心の平均位置

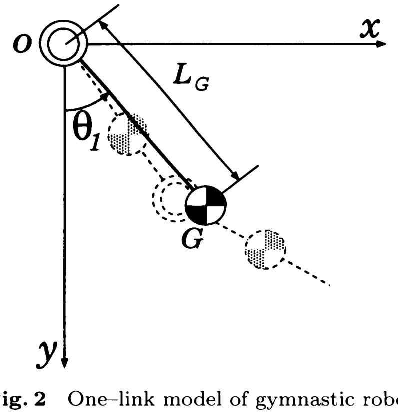


Fig. 2 One-link model of gymnastic robot

このとき, 振り子の運動は周期 T が

$$T = 4\sqrt{\frac{\ell_G}{g}}\int_0^{\pi/2}\frac{d\phi}{\sqrt{1 - k^2\sin^2\phi}} \tag{15}$$
$$k = \sin\frac{\theta_{\max}}{2}$$
$$\dot{\theta} = 0 \text{ のとき } \theta = \theta_{\max}$$

で表される周期関数となるから, 振り子の運動は

$$\theta_1 = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega t) \tag{16}$$
$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

とできる.

以上の条件のもとで, さらに

$$\sin(\theta_1 + \theta_2) \approx \sin\theta_1 \tag{17}$$

と近似できるとすると, 式 (3) より次式の関係が得られる.

$$g\sin\theta_1 = -\frac{N_1}{M_1}\ddot{\theta}_1 - \frac{N_2}{M_1}\ddot{\theta}_2 + \frac{N_3}{M_1}\dot{\theta}_1\theta_2\dot{\theta}_2 + \frac{N_4}{M_1}\theta_2\dot{\theta}_2^2 \tag{18}$$
$$M_1 = m_1L_{g1} + m_2L_1 + m_2L_{g2}$$
$$N_1 = J_1 + J_2 + 2m_2L_1L_{g2}$$
$$N_2 = J_2 - m_2L_1L_{g2}$$
$$N_3 = 2m_2L_1L_{g2}\dot{\theta}_1\theta_2\dot{\theta}_2$$
$$N_4 = m_2L_1L_{g2}$$

式 (7) (16) (18) を式 (17) を利用して近似したエネルギー変化率の式に代入し, 1周期 T にわたって平均をとると次式となる.

$$\left\langle\frac{dE}{dt}\right\rangle = \frac{a_1\beta\omega^3}{2}\{B_1a_1\beta\sin(2\phi) + B_2\sin\phi\} - \frac{D_1a_1^2\omega^2}{2} \tag{19}$$
$$B_1 = \frac{m_2L_1L_{g2}}{4}$$
$$B_2 = J_2 + m_2L_1L_{g2} - \frac{m_2L_{g2}N_1}{M_1}$$

第1リンクの振幅が大きく

$$a_1\beta \gg \frac{B_2}{B_1} \tag{20}$$

が成り立つとき, $\phi = \frac{\pi}{4}$ のときエネルギー変化率が最大になることが分かる.

いま, 支点から重心 G までの距離 L_G は

$$L_G = \sqrt{C_1 + C_2\cos\theta_2} \tag{21}$$

$$C_1 = \frac{(m_1L_{g1} + m_2L_1)^2 + m_2L_{g2}^2}{(m_1 + m_2)^2}$$
$$C_2 = \frac{2m_2L_{g2}(m_1L_{g1} + m_2L_1)}{(m_1 + m_2)^2}$$

となるから（付録A参照），$|\theta_2| \ll 1$ の場合，

$$L_G = \sqrt{C_1 + C_2} - \frac{C_2}{4\sqrt{C_1 + C_2}}\theta_2^2 \tag{22}$$

と展開できる．したがって，第1リンクと第2リンクが位相差 $\phi = \frac{\pi}{4}$ の関係を保ちながら同期しているとき，

$$\theta_2 = \beta \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) \tag{23}$$

上式を式（22）に代入して整理すると

$$L_G = \ell_g - \sigma \sin(2\omega t) \tag{24}$$

ただし，

$$\ell_g = \sqrt{C_1 + C_2} - \frac{\sqrt{C_2 \beta^2}}{8\sqrt{C_1 + C_2}}$$

$$\sigma = \frac{C_2 \beta^2}{8\sqrt{C_1 + C_2}}$$

となる．以上のことから，鉄棒ロボットの第1リンクと第2リンクが $\frac{\pi}{4}$ の位相関係で運動しているとき，その等価的な単振り子の運動を考えると，振り子の振れと重心の上下運動が1:2の割合で同期していることに相当し，ブランコの振れを励起させる場合と等価であることが分かる[3]．したがって，第1リンクの振れが第2リンクの振れよりも大きくなった場合は，パラメータ共振現象を利用して第1リンクの振れを励起するとよいことが分かる．

4. 引き込みを利用した鉄棒ロボットの運動制御

前章では，鉄棒ロボットの第1リンクの振れが微小な場合と大きくなった場合に分けて，第1リンクの振れを励起できるタイミングを解析した．その結果，それぞれの場合では第1リンクと第2リンクを同期させる位相差が異なることを明らかにした．本章では，非線形振動子の引き込み現象を利用して，各リンクをを同期させる方法について述べる．

非線形振動子として van der Pol 方程式，その入力として鉄棒ロボットの第1リンクの角速度を加えたものを考える．

$$\ddot{x} - \varepsilon(1 - \dot{x}^2)\dot{x} + \omega_x^2 x = K\dot{\theta}_1 \tag{25}$$

鉄棒ロボットの第1リンクが式（16）で運動しているとき，$\omega_x \simeq \omega$，または K が十分大きいとき，van der Pol 方程式の周期解と θ_1 が同期する[3]．

このとき，方程式に与える初期値を適当に調整すると，その周期解は次式となる．

$$x = \zeta \sin(\omega t) \quad (\zeta > 0) \tag{26}$$

したがって，鉄棒ロボットの振り始めは第2リンクを方程式の解を利用して

$$\theta_2 = E\dot{x} \quad (E > 0) \tag{27}$$

とすることにより，第1リンクと第2リンクの位相差を $\frac{\pi}{2}$ とできる．

また，第1リンクの振れが大きくなった場合は

$$\theta_2 = E\left\{\cos\left(\frac{\pi}{4}\right) AG_1 x + \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) AG_2 \dot{x}\right\} \tag{28}$$

AG_1, AG_2 は $x, \dot{x}$ の振幅を1にする変数

とすることにより，第1リンクと第2リンクの位相差を $\frac{\pi}{4}$ とできる．

5. 実　　験

本章では前章で示した鉄棒ロボットの制御方法の有効性を確認するために，実際にロボットを製作し実験を行った結果について述べる．

5.1 鉄棒ロボットの構成

Fig. 3 に製作した鉄棒ロボット，**Table 2** にロボットの各パラメータを示す．

ロボットの第2関節部にラジコン用のサーボモータが取り付けてあり，このモータが回転することにより第2リンクを動かすことができる．制御器には富士通社製 FM/V–BIBLO–NP13(OS–Linux) を使用し，制御プロセスはC言語で記述，制御周期は 20 [msec] で行った．制御器の出力は制御器のパラレルポートから出力されモータを駆動する．第1関節の角速度は第2関節のモータ部に取り付けられた圧電ジャイロセンサ（村田製作所製 ENC–05S）の出力を A/D 変換しパラレルポートから制御器に取り込んでいる．また，van der Pol 方程式の解は制御周期ごとに4次の Runge–Kutta–Gill 法により計算した．このとき，方程式に与えた初期値は $(x, \dot{x}) = (0.01, 0)$ であり，使用した方程式の各パラメータは $(K, \varepsilon, \omega_k) = (8, 1.3, 8.1)$ である．

5.2 実験結果

鉄棒ロボットの運動の様子を8ミリビデオカメラで撮影し，1/30 [sec] ごとの振れの角度を計算して，グラフにプロットした結果を **Fig. 4** (a)～(c) に示す．

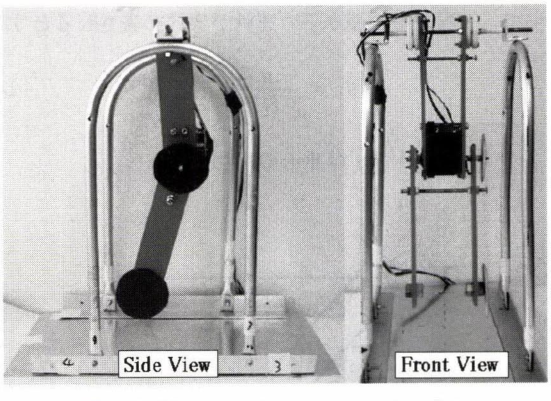
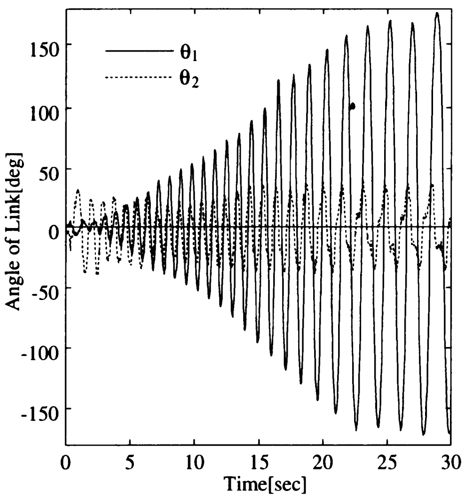


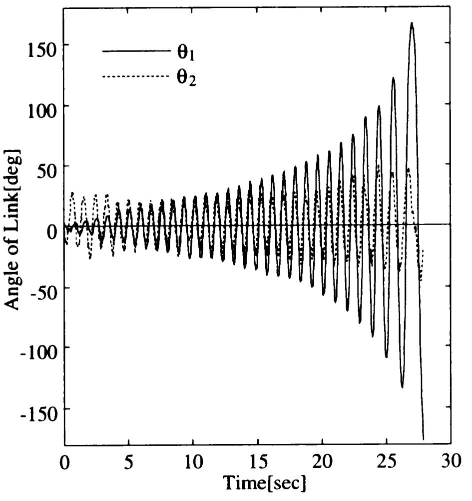
Fig. 3 Horizontal bar gymnastic robot

Table 2 Parameters of gymnastic robot

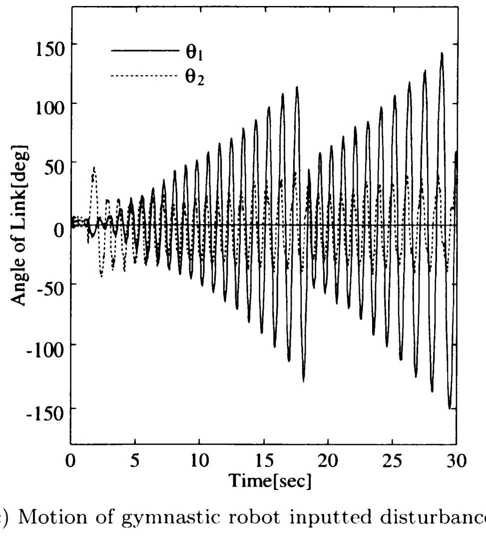
Parameter	1st Link	2nd Link
Mass [kg]	$m_1 : 0.14$	$m_2 : 0.06$
Length [m]	$L_1 : 0.135$	$L_2 : 0.135$
Center of Mass [m]	$L_{g1} : 0.075$	$L_{g2} : 0.08$
Moment of Inertia [N · m²]	$J_1 : 3.85e^{-3}$	$J_2 : 1.53e^{-3}$



(a) $\phi = \frac{\pi}{2}$ [rad]



(b) $\phi = \frac{\pi}{4}$ [rad]



(c) Motion of gymnastic robot inputted disturbance

Fig. 4 Swing–up control of gymnastic robot

Fig. 4 (a) は第 1 リンクと第 2 リンクの位相差を $\phi = \frac{\pi}{2}$，Fig. 4 (b) は位相差を $\phi = \frac{\pi}{4}$ で同期させた場合である．第 3 章の解析で示したように，第 1 リンクの振れが小さい場合は $\phi = \frac{\pi}{2}$，振れが大きくなったときは，$\phi = \frac{\pi}{4}$ の方が振幅の増加率が大きいことが分かる．また，Fig. 4 (a) より第 1 リンクの運動は定常に達し，振幅がほとんど増加しなくなることが分かる．これはエネルギー変化率式（19）より，第 1 リンクの振れが増加した場合，左辺第 2 項の損失エネルギーの項が大きくなり

$$\left\langle \frac{dE}{dt} \right\rangle = 0 \tag{29}$$

となるためであると考えられる．第 2 リンクの振幅を増加させると，ロボットを回転させることは可能であるが，振れが大きくなったときのエネルギー増加率が小さいため，回転を始めるときに勢いをつけることができず，連続的に回転できない．しかし，$\phi = \frac{\pi}{4}$ の場合は，180° 付近でエネルギー増加率が非常に大きいため，加速して回転運動に入ることができ，連続で 6 〜8 回の大車輪を実現することができた．

Fig. 4 (c) は位相差 $\frac{\pi}{2}$ で振れを増加させているとき，第 1 リンクと第 2 リンクの同期をくずすために外乱を加えた場合である．外乱を加えられても再び同期し，振れが増加していくことが分かる．

6. おわりに

本論文では鉄棒ロボットの振れを励起できるタイミングとして，振り始めは共振現象，振れが大きくなった場合には，パラメータ共振現象を利用して振れを励振させるとよいことを明らかにした．さらに，非線形振動子の引き込み現象を利用して，第 1 リンクと第 2 リンクを同期させて制御する方法を提案した．本手法では第 1 リンクのおおよその周期と角速度だけが分かればよく，非常に簡単な制御則で鉄棒ロボットで大車輪を実現することができる．今後は，3 リンク以上の鉄棒ロボットにも本研究の手法を適用したいと考えている．

付録 A. 式（21）の導出

Fig. 1 において，原点 O から各リンクの重心への位置ベクトルを $\boldsymbol{r}_1 = [x_1, y_1]^T, \boldsymbol{r}_2 = [x_2, y_2]^T$ とし，Fig. 2 において，すべての質量が重心 G に集中しているとすると，その位置ベクトル $\boldsymbol{r}_G = [x_G, y_G]^T$ は

$$\boldsymbol{r}_G = \frac{m_1\boldsymbol{r}_1 + m_2\boldsymbol{r}_2}{m_1 + m_2} \tag{30}$$

と定義できる [7].

上式より，重心 G への位置ベクトル $\boldsymbol{r}_G$ の各成分は

$$\begin{aligned} x_G &= \frac{m_1x_1 + m_2x_2}{m_1 + m_2} \\ y_G &= \frac{m_1y_1 + m_2y_2}{m_1 + m_2} \end{aligned} \tag{31}$$

となり，Fig. 2 における重心までの距離 L_G は

$$L_G = \sqrt{x_G^2 + y_G^2} \tag{32}$$

となる．

Fig. 1 において各リンクの重心への位置ベクトルの成分は

$$x_1 = L_{g1}\sin\theta_1$$
$$y_1 = L_{g1}\cos\theta_1 \quad (33)$$

$$x_2 = L_1\sin\theta_1 + L_{g2}\sin(\theta_1+\theta_2)$$
$$y_2 = L_1\cos\theta_1 + L_{g2}\cos(\theta_1+\theta_2) \quad (34)$$

となるから，式（31）（33）（34）を式（32）に代入して整理すると式（21）が導出できる．

参考文献

[1] 梶原 他："皿まわしの数理とロボットによる実現"，日本ロボット学会誌，vol.16, no.4, pp.483–490, 1998.

[2] 梶原 他："引き込みを利用したブランコの振れ制御"，日本ロボット学会誌，vol.17, no.4, pp.520–525, 1999.

[3] 林 他："二重物理振り子の制御"，日本機械学会論文集（C），vol.56, no.522, pp.175–178, 1990.

[4] 高嶋 俊："鉄棒運動ロボットの制御"，第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.619–620, 1990.

[5] 小島 他："非駆動関節を有する2関節形鉄棒ロボットに関する研究"，日本機械学会論文集（C），vol.57, no.539, pp.125–130, 1991.

[6] 橋本 他："鉄棒ロボットの運動制御"，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'92講演論文集（Vol.A），pp.45–50, 1992.

[7] 原島 鮮：力学．p.157，裳華房，1958.

梶原秀一（Hidekazu Kajiwara）

1971年1月25日生．1995年室蘭工業大学博士前期課程電気電子工学専攻修了．現在釧路工業高等専門学校電子工学科助手．制御工学，ロボット工学の研究に従事，計測自動制御学会の会員．（日本ロボット学会正会員）

松田敏彦（Toshihiko Matsuda）

1934年1月20日生．1956年室蘭工業大学電気工学科卒業．北海道大学工学部助手，室蘭工業大学講師，助教授を経て1978年同大学電気工学科教授．現在同大学電気電子工学科教授．工学博士，電気機器，電動機制御に関する研究に従事．電気学会の会員．

橋本幸男（Yukio Hashimoto）

1953年3月8日生．1979年室蘭工業大学大学院修士課程電子工学専攻修了．高校の非常勤講師等を経て1983年室蘭工業大学電子工学科助手．1990年より同大学電気電子工学科助手，現在助教授．制御工学，メカトロニクスの研究に従事．工学博士，計測自動制御学会の会員．（日本ロボット学会正会員）

土谷武士（Takeshi Tsuchiya）

1941年2月2日生．1965年北海道大学大学院修士課程電気工学専攻修了．1966年同大学工学部電気工学科講師，1983年同教授，1997年より同大学大学院工学研究科教授．制御工学，ロボット工学，パワーエレクトロニクスなどの研究に従事．工学博士．計測自動制御学会，システム制御情報学会，日本機械学会，電気学会，日本ファジィ学会，IEEEの会員．（日本ロボット学会正会員）