1A2-1

# 倒立振子のパラメータ励振原理による 効率的な二足動的歩行のための目標軌道設計

Target Trajectory Design of Parametrically Excited Inverted Pendulum

for Efficient Bipedal Walking

本城 豊之 (神戸大学) 正 林 健志 (産業技術総合研究所)
 長野 明紀 (神戸大学) 羅 志偉 (神戸大学)

Toyoyuki HONJO, Kobe University, carcharo-mack@cs11.cs.kobe-u.ac.jp Takeshi HAYASHI, AIST Akinori NAGANO, Kobe University Zhi-Wei LUO, Kobe University

In the study of efficient bipedal walking, the center of robot's total mass have been treated as an inverted pendulum. We have studied control methods in which this inverted pendulum follows the target trajectory of parametric excitation. In this paper, we propose a new target trajectory design method for efficient bipedal walking. This target trajectory was represented by a product of two sigmoid functions. We analyzed the relationship between parameters of target trajectory and energy efficiency. As a result, we found that the gentle rising and falling of the target trajectory contributed to energy efficiency via numerical simulations of an inverted pendulum and a bipedal robot. Then, we achieved efficient dynamic walking used by proposed target trajectory.

Key Words : Dynamic Bipedal Walking, Parametric Excitation, Energy Efficiency

# 1. はじめに

近年のロボットの二足歩行研究では、ただ安定に平地歩 行を達成するだけではなく、エネルギー効率や不整地での 安定な歩行など歩行性能を向上させることが目標とされて いる.エネルギー効率向上を目指すうえで、関節毎の仕事 を軽減するために、ロボット自身の動特性を巧みに利用す ることが考えられてきた. そして, このようなダイナミク スベースの一歩行形態である受動歩行が永く注目されてき た. 受動歩行とは, 1990年に McGeer により提唱された 動的歩行の概念である [1]. 受動歩行では重力のみを駆動力 としているため、アクチュエータや制御入力を必要としな いが、平地において動的歩行を継続するためには、地面と の衝突等で失われるエネルギーを補填する必要がある. こ の歩行継続に必要なエネルギーを効率的に生成する手法と して、浅野らによって提案されたパラメータ励振原理を用 いた歩行方法がある [2]. この手法では、片脚支持期の遊脚 の運動に着目をし、直動アクチュエータ [2] や膝関節 [3] の 駆動によって遊脚の重心位置を適切に制御することでパラ メータ励振を引き起こし、歩容を継続する. これらの手法 は、遊脚の運動のみを考慮して軌道制御を行っているが、 二脚ロボットは股関節によって遊脚が支持脚とつながって いる以上、遊脚は股関節を通して支持脚の運動の影響を強 く受けると考えられる.よって支持脚の影響を考慮するた め,我々はロボット全体の重心位置を倒立振子に見立て, 倒立振子におけるパラメータ励振の最適軌道に追従するよ うに制御することで、エネルギー効率に優れた歩行が可能 であると考えた [4].

本研究では、以前提案した倒立振子のパラメータ励振歩 行をより発展させるべく、2つのシグモイド関数の積で構 成された新たな目標軌道を提案した、そして、提案する目 標軌道の形状を定めるパラメータとエネルギー効率の関係 を確かめるために倒立振子による数値実験を行った、その 結果、以前に考慮していた最適軌道の条件が実際にはエネ ルギー効率を悪化させる可能性があることを導出した、そ して、この事実を検討するために、数値シミュレーション による動歩行実験を行った。

# 2. 倒立振子のパラメータ励振原理と目標軌道

本節では、倒立振子のパラメータ励振の原理と新しく提 案する目標軌道について説明し、軌道設計パラメータとエ ネルギー効率の関係を調べるための倒立振子による数値実 験に関して述べる.

# 2.1 倒立振子のパラメータ励振原理

パラメータ励振原理の身近な例としては、人がブランコ に乗っているときに適時膝を曲げ伸ばしすることで重心位 置を変化させ、ブランコの振幅を増幅させている事象が挙 げられる.このパラメータ励振原理によって力学的エネル ギーを最大限に増大させる重心位置の最適軌道は図1で与 えられ、この最適軌道は以下の式から求められる.

$$K = \frac{1}{2}mL^{2}\dot{\theta}^{2}$$

$$N = mL^{2}\dot{\theta}$$

$$\dot{N} = mgL\sin\theta$$
(1)

ここで, mは倒立振子の質量, Lは振子長, gは重力加速 度, θは倒立振子の位相である.また, Kは運動エネル ギー, Nは角運動量である.即ち,倒立振子が鉛直に達し たときに重心を引き上げ,位相が最大となる位置で重心を 引き戻す軌道をとる事で最大の励振効果が得られると考え られる.ここでは,振子の長さは瞬間的に変化させられる ものとする.しかし,実際には振子長を瞬間的に変化させ ることは不可能であるため,力学的エネルギーをより増大 できるような最適軌道に近い目標軌道が研究されてきた. 浅野らや原田らはそれぞれ直動アクチュエータによって伸 縮する遊脚や回転駆動する膝関節を持つ遊脚に対して目標 軌道を設計した.その目標軌道は,順振子のパラメータ励 振原理の最適軌道に近づくように三角関数を用いて設計し た目標軌道を用い,パラメータ励振による平地動歩行を達 成した [9] [9]



Fig. 1 The optimal trajectory of parametrically excited inverted pendulum.

# 2.2 シグモイド関数による目標軌道

ここで提案する倒立振子の振子長*L*に対する目標軌道は 以下の形で与えられる.

$$L_d(X_g) = L_0 + \frac{A}{1 + e^{-\alpha(X_g - \beta_1)}} \times \frac{1}{1 + e^{\alpha(X_g - \beta_2)}} \quad (2)$$

ここで、 $L_0$ は振子長の初期値、 $X_g$ は振子の重心位置の水 平成分、Aは伸縮量、 $\alpha$ は立ち上がりの勢いを決めるパラ メータ、 $\beta_1 \geq \beta_2$ は立ち上がりの開始位置と終了位置を決 めるパラメータである. この目標軌道の例を図 2 に示す. 図 2 からわかるように、 $\alpha$ が大きくなるほど急激に振子長 が変化するため、先に示した最適軌道により近い軌道を形 成する. しかし、 $\alpha$ を大きくとりすぎると、目標速度 $\dot{L}_d$ が大きな値をとりうるため、制御における安定性やエネル ギー効率を損なう可能性がある. また、 $\beta_1 \geq \beta_2$ の間隔が 広いほど励振区間が大きくなるため、エネルギーの変化量 が増加すると期待できる. 最適軌道に近づけるためには、  $\beta_1$ を原点付近に、 $\beta_2$ をより前方にとることが考えられる.



Fig. 2 Reference trajectory of telescopic length  $L_d(X_g)$ with three values of  $\alpha(\alpha_1 = 40, \alpha_2 = 60, \alpha_3 = 80)$ 

### 2.3 シグモイド関数を用いた目標軌道

提案したシグモイド関数を用いた目標軌道の有効性を検 討するため、倒立振子による数値実験を行った.内容とし ては、目標軌道の形状を決定するパラメータ  $[\alpha, \beta_1, \beta_2]$ を変化させた際に、それぞれの目標軌道に従って倒立振子 の振子長を制御し、実験の前後における力学的エネルギー の変化量  $\Delta E$  とエネルギー効率 SR を調べる.エネルギー 効率 SR とは specific resistance の略であり、以下の式で表 わされる.

$$SR = \frac{\int_{0^+}^{T^-} \left| \dot{L}u \right| \, \mathrm{d}t.}{M_G \cdot DX_G},\tag{3}$$

ここで、分子はアクチュエータがした仕事であり、 $M_G$ は 質量、 $DX_G$ は重心の水平移動量を表す.すなわち、SRと はある系において単位質量のものが単位距離移動するため に必要なエネルギー量を表す無次元量である.この値が小 さいほどエネルギー効率に優れているといえる.実験を通 して、倒立振子の初期条件はすべて同じであり、倒立振子 の位相の値域は $-\theta_* \sim \theta_*$  ( $\theta_* > 0$ )である.実験に使用した パラメータと [ $\alpha\beta_1\beta_2$ ]の値域を表 1 に記す.

Table 1 Physical parameters used in the simulation

	-	
m	20.0	[Kg]
$L_0$	0.80	[m]
θ.	0.25	[rad]
A	0.04	[m]
$\alpha$	40 - 80	[-] <sup>1</sup>
$\beta_1$	$(-0.10 \sim 0.10) L_0 sin(\theta_*)$	[m]
$\beta_2$	$(0.50 \sim 0.70) L_0 sin(\theta_*)$	[m]

Table 2 Simulation	results:	$\Delta E$ (	$(\alpha = 40)$	
--------------------	----------	--------------	-----------------	--

$\beta_1$ $\beta_2$ $\beta_1$	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10
0.50	0.0362	0.0369	0.0372	0.0373	0.0369
0.55	0.0487	0.0493	0.0496	0.0496	0.0492
0.60	0.0652	0.0658	0.0661	0.0660	0.0656
0.65	0.0872	0.0878	0.0880	0.0879	0.0875
0.70	0.1162	0.1168	0.1170	0.1169	0.1164

$\beta_1$ $\beta_2$	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10
0.50	0.0149	0.0143	0.0137	0.0129	0.0121
0.55	0.0152	0.0147	0.0142	0.0135	0.0128
0.60	0.0154	0.0150	0.0145	0.0140	0.0133
0.65	0.0155	0.0152	0.0147	0.0142	0.0137
0.70	0.0154	0.0151	0.0148	0.0144	0.0139

Table 3 Simulation results: SR ( $\alpha = 40$ )

Table 4 Simulation results:  $\Delta E \ (\alpha = 80)$ 

$\beta_1$ $\beta_2$ $\beta_1$	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10
0.50	0.0186	0.0191	0.0193	0.0191	0.0186
0.55	0.0234	0.0240	0.0242	0.0240	0.0234
0.60	0.0297	0.0302	0.0304	0.0302	0.0297
0.65	0.0385	0.0391	0.0392	0.0390	0.0385
0.70	0.0522	0.0528	0.0529	0.0527	0.0522

Table 5 Simulation results: SR ( $\alpha = 80$ )

					/
$\beta_1$ $\beta_2$	-0.10	-0.05	0.00	0.05	0.10
0.50	0.0179	0.0178	0.0175	0.0171	0.0166
0.55	0.0180	0.0179	0.0177	0.0174	0.0170
0.60	0.0180	0.0179	0.0178	0.0176	0.0173
0.65	0.0179	0.0179	0.0178	0.0177	0.0175
0.70	0.0178	0.0177	0.0177	0.0176	0.0175

シミュレーション結果を表 2-5 に載せる.表 2,4 はエ ネルギーの変化量  $\Delta E \epsilon$ ,表 3,5 はエネルギー効率 SR をそれぞれ示している.結果より、 $\beta_1$ を原点に取り、 $\beta_2$ が大きくなるほどエネルギーの変化量  $\Delta E$  が向上する.こ れは最適軌道に近づいたため励振効果が高まったためと考 えられる.また、懸念していた様に  $\alpha \epsilon$ 大きくするとエネ ルギー効率は悪化した.さらに、最適軌道により近い軌道 となるにもかかわらず、 $\alpha$ が増大するにつれ力学的エネル ギーの増加量  $\Delta E$  は減少した.これは、急激な振子長の変 化によって角速度が減速したためと考えられる.以上から、 効率性を追求した場合、図 1 の最適軌道のような急激な立 ち上がりではなく、緩やかな立上りが望まれると考えら れる.

### 3. 2足歩行ロボットの定式化

本論文で扱う2足歩行ロボットのモデルを図3に示す. このロボットは膝関節を有し、3自由度の剛体リンク系で 表される.このロボットは、片脚支持期において屈曲して いた膝関節が伸びきった ( $\theta_2 = \theta_3$ )際に機械的にロックさ れ、拘束力によって遊脚は一直線に固定される.その後、 遊脚と地面との衝突が発生するものとする. 片脚支持期における運動方程式は以下で表わされる.

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) = \boldsymbol{S}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}.$$
 (4)

ここで,  $M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は慣性行列,  $h \in \mathbb{R}^{3}$  はコリオリ力・ 遠心力・重力を表すベクトル,  $\mathbf{q} = [\theta_{1} \ \theta_{2} \ \theta_{3}]^{\mathrm{T}}$  は一般化座 標ベクトルであり,  $\theta$  は 時計回りを正回転とした.また,  $Su \in \mathbb{R}^{3}$  ( $\mathbf{S} = [0\ 1\ -1]^{\mathrm{T}}$ ) は入力ベクトル,  $J(q)^{\mathrm{T}}\lambda \in \mathbb{R}^{3}$ はホロノミック拘束力を表すベクトルであり, 遊脚の膝関 節における駆動力と拘束をそれぞれ与える.この拘束力は 膝関節がロックされた時にのみ発生し,膝関節を一直線に 拘束する.また片脚支持期と次の片脚支持期の間に,瞬間 的な状態の遷移を行う両脚支持期が存在する. 両脚支持期 は,遊脚先端と地面との衝突であり,これによって支持脚 と遊脚が交換される. 遊脚と地面の間で生じる衝突は非完 全弾性衝突であるとし,衝突の直前直後の値をそれぞれ  $\dot{q}^-$ , $\dot{q}^+$ とした場合

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^{+} = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}^{-} - \boldsymbol{J}_{I}(\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_{I}, \qquad (5)$$

で表わされる. ここで  $\lambda_I$  は速度拘束条件  $J_I(q)\dot{q}^+ = 0$ を 満たす拘束力であり、衝突は瞬間的なものであることから 衝突の前後において両脚の位相は変化しない. そのため、 拘束力は以下の形で表わされる.

$$\boldsymbol{\lambda}_{I} = -(\boldsymbol{J}_{I}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}_{I}^{\mathrm{T}})^{-1}\boldsymbol{J}_{I}\dot{\boldsymbol{q}}^{-}$$
(6)



Fig. 3 Model of a planar kneed biped robot.

# 4. 歩行シミュレーション

この節では、3節で示した膝付二脚モデルを用いて、2 節で示された目標軌道の結果がロボットによる歩行におい ても現れるかを検証する.歩行時の倒立振子の振子長の伸 縮は主に膝関節の屈曲によって行うため、遊脚の膝関節の 目標軌道を提案したシグモイド関数による軌道で与えた.

### 4.1 実験内容

膝関節駆動のパラメータ励振歩行では、駆動力は膝関節 にのみ働く [3]-[4]. 膝関節の屈曲によって上腿よりも重い 下腿を操作し、パラメータ励振を引き起こすため、2節で 提案した目標軌道を膝の相対角度  $\theta_K = -\theta_2 + \theta_3$  に以下の ように与える.

$$\theta_K(X_g) = \frac{A}{1 + e^{-\alpha(X_g - \beta_1)}} \times \frac{1}{1 + e^{\alpha(X_g - \beta_2)}}$$
(7)

この目標軌道における  $\alpha \beta_1 \beta_2$  を変化させた場合のエネル ギー効率を求め、2節の倒立振子と同様の結果が得られる かを検証する.変化させる3つのパラメータ  $\alpha \beta_1 \beta_2$ の変 域はそれぞれ  $\alpha = 50 \sim 100, \beta_1 = 0.13 \sim 0.17, \beta_2 = -0.07$ ~0.0 とした.その他のシミュレーションに用いた各パラ メータは表6に記す.



Table 6 Physical parameters used in the walking simulation

parameter	value	unit	parameter	value	unit
$l_1$	1.0	[m]	R	0.6	[m]
<b>b</b> 1	0.35	[m]	$m_1$	5.0	[Kg]
$l_2$	0.5	[m]	$m_2$	1.0	[Kg]
$l_3$	0.5	[m]	$m_3$	4.0	[Kg]
$a_2$	0.25	[m]	$m_H$	8.0	[Kg]
a3	0.25	[m]	A	1.2	rad

#### 4.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を表 7-9 に記す.表 7-9 はそれぞ れ  $\alpha$   $\beta_1$   $\beta_2$  を変化させた場合のエネルギー効率 SR である. ここで、歩行結果はすべて 2 周期の定常歩行となったため、 定常歩行時の各ステップの SR とその平均値を示した. *step1* は  $\theta_1$  が  $-\theta_{s1}$  から  $\theta_{s2}$  へと変化した場合であり、 *step2* は  $\theta_1$  が  $-\theta_{s2}$  から  $\theta_{s1}$  へと変化した場合である. こ こで、 $\theta_{s1}$ ,  $\theta_{s2}$  は定常歩行時の初期位相であり、  $\theta_{s2} > \theta_{s1} > 0$ である.

表 7-9 より、2節で示した倒立振子の結果と同様に、立ち 上がりの勢いが緩やかなほどエネルギー効率に優れること が分かった.また、エネルギー効率を追求する場合、目標 軌道の立上り、立下り間隔を広げる以上に、立上がりの勢 いを変化させる方が効果的であると考えられる.今回、一 番エネルギー効率に優れた歩行結果と、一番エネルギー効 率の悪い歩行結果を図4と5に示す.双方とも非常によく 似た挙動を示しているが、図5の方が膝を長い時間より深 くまで曲げるため、膝関節の仕事が増加し、エネルギー効 率を悪化させたと考えられる.

	Table	7	Simulation	results:	6
--	-------	---	------------	----------	---

α [-]	50	60	70	80	90	100
step 1	0.0337	0.0467	0.0629	0.0812	0.1009	0.1217
step 2	0.0289	0.0313	0.0385	0.0482	0.0595	0.0718
average	0.0313	0.0390	0.0507	0.0647	0.0802	0.0968

Fable	8	Simulation	results.	ß,
Lanc	0	Simulation	results.	$\mu_1$

$\beta_1 \ [m]$	-0.07	-0.05	-0.04	-0.03	-0.01	0.0
step 1	0.0436	0.0463	0.0467	0.0466	0.0454	0.0445
step 2	0.0332	0.0319	0.0313	0.0309	0.0299	0.0295
average	0.0384	0.0391	0.0390	0.0387	0.0377	0.0370

Table 9 Simulation results: $\beta_2$								
$\beta_2 \ [m]$	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17			
step 1	0.0422	0.0445	0.0467	0.0484	0.0495			
step 2	0.0347	0.0326	0.0313	0.0312	0.0315			

0.0398 0.0405

average 0.0385 0.0385 0.0390

#### 5. おわりに

本研究では、効率的な動的二足歩行を目指して、倒立振 子のパラメータ励振歩行のためにシグモイド関数を用いた 新たな目標軌道を提案した.また,提案した目標軌道の形 状を決定するパラメータとエネルギー効率の関係を調べ た.そして,立上り,立下りのタイミングは最適軌道にお ける理論と一致したが、立上りの勢いに関しては不連続な 最適軌道とは異なり、振子長の立上りが緩やかなほど増加 する力学的エネルギーとエネルギー効率が向上することを 確かめた、そして、数値シミュレーションによって、ロ ボットによる歩行においても同様の傾向が現れることを示 した.以上から、これまで最適軌道により近い目標軌道の 設計がなされてきたが,振子長の伸縮に関しては最適軌道 とは異なり緩やかに変化させることが効率的な歩行へとつ ながることを確認した.今回は目標軌道を膝関節にのみ用 いたが、今後は股関節駆動との組み合わせやパラメータの 設定によって、さらにエネルギー効率に優れた歩行を追求 できると考えている.

#### 文献

- T.McGeer, "Passive dynamic walking," The Int. J. of Robotics Research, vol.9, no.2, pp.62-82, 1990.
- [2] 浅野文彦, 羅志偉, "パラメータ励振に基づく伸縮脚ロボットの動的 歩行制御",日本ロボット学会誌,vol.23, no.7, pp.910-918, 2005.
- [3] Y. Harata, F. Asano, Z.W. Luo and Y. Uno, "Biped Gait Generation based on Parametric Excitation by Knee-joint Actuation," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Sys*tems, 2007.
- [4] 本城豊之,長野明紀,羅志偉,"倒立振子のパラメータ励振原理による動歩行制御",第20回日本ロボット学会学術講演会,2008.