

# 目標ダイナミクスに基づく 平面4リンクロボットの床運動制御

## Control of Planar Four-link Gymnastic Robot based on Target Dynamics

○横山直人, 玄 相昊, 江村 超, 鈴木正俊

○Yokoyama Naoto, Sang-Ho Hyon,  
Emura Takashi, Suzuki Masatoshi

東北大学工学研究科

Tohoku University

キーワード： 目標ダイナミクス(Target Dynamics), 跳躍ロボット(Jumping Robot)

角運動量 (Angular Momentum), 後転跳び(Back HandSpring)

連絡先： 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学大学院工学研究科バイオロボティクス専攻  
ロボティクス講座知能メカトロニクス分野, TEL:022-217-6969 FAX:022-217-7027 E-mail:sangho@ieee.org

### 1. はじめに

現在, 様々なヒューマノイドロボットが歩行を実現し, 次なる運動に挑戦しようとしている. 本研究では, 跳躍, 後転跳び, 跳ねとび起きなどの比較的動作の速い床上のアクロバティックな運動を行うことを目的とし, 将来のヒューマノイドの運動機能の向上を目的としている. これにより, ヒューマノイドの活動範囲が広がり, さまざまな場面において活躍できると考えられる.

床上のアクロバットロボットの研究例としては, MITのRaibertらの直動型の足を持った2足歩行ロボットによる宙返りがある<sup>1)</sup>. このロボットは, モデルが非常に単純であり, 宙返りがフィードフォワード的な制御で簡単にできる. また, 最近では有川らによってを目的とした回転関節型ロボットの研究がなされている<sup>2)</sup>. このロボットは2点境界値問題をオフラインで計画し, 軌道追従により運動を行っている.

本稿では, Fig.1のような平面4リンクロボットを対象とした床運動制御について述べる. 本研究においてはロボットの運動を大局的に表す重心と

角運動量に着目し, それらに目標ダイナミクスを設定することにより, モデル追従させるという方法を用いる. これにより, 複雑で高速な運動をリアルタイムで, かつ簡単に行えると考えられる. まず, 足平を考慮しない3リンクロボットモデルを考え, モデルの運動方程式を導出する. 次に目標ダイナミクスに基づいた制御方法について述べる. その一例として, 後転跳びのシミュレーションについて結果を示し, その実験結果を示す.

### 2. ロボットモデル

#### 2.1 機械モデル

Fig.1に示した実機械モデルについて簡単に述べる. 各関節は定格出力20[W]のDCモータ(エンコーダ付)の駆動力をタイミングプーリにより伝達して駆動する. モータは外部のLinuxマシンに搭載したコントロールボードRIF-01のDACによりモータドライバ(TITech Driver)に指令値が送られ, 電流制御される. 制御周期は1.3[ms]である. また, ロ

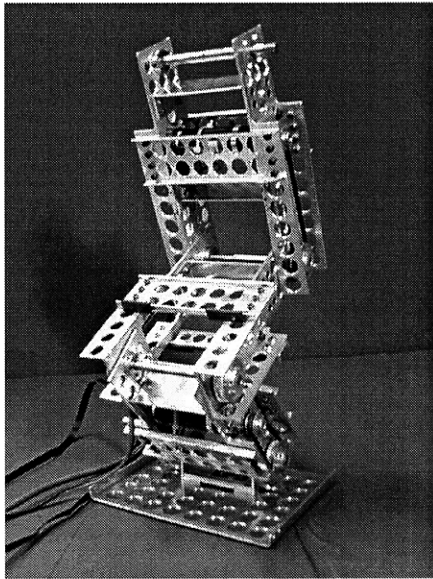


Fig. 1 Robot prototype

Table 1 Parameter

	Link1	Link2	Link3
Mass [kg] $\times 10^{-3}$	625.7	532.9	579.3
Link length [m]	0.13	0.15	0.19
*Position of CG [m]	0.031	0.55	0.086
Inertia [kgm <sup>2</sup> ] $\times 10^{-4}$	12.0	8.8	16.0
Initial angle [deg]	120	-94	90

\*Position of CGとは、リンク*i* (*i*=1, 2, 3)のジョイント*i*からの重心の距離である。

ボットの物理パラメータをTable.1に示す.総質量は1.738[kg]で、全長は0.462[m]である。

## 2.2 運動方程式

制御則の導出を簡単にするために、足平は考慮せず足首を原点としたFig.2のような3リンクロボットの運動方程式を考える。一般化座標は $q = [X_0, Z_0, \psi_1, \psi_2, \psi_3]$ である。ここで、 $X_0$ は足首のx座標、 $Z_0$ は足首のz座標、 $\psi_1$ はリンク1と床との絶対角、 $\psi_2$ はリンク1とリンク2の相対角、 $\psi_3$ はリンク2とリンク3の相対角とする。運動方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} J(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) &= u + E^T \lambda \\ E\dot{q} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$J(q)$ はモデルの慣性行列、 $H(q, \dot{q})$ はコリオリ、遠心力項、 $u$ は一般化入力、 $\lambda$ は拘束力であり、ここで

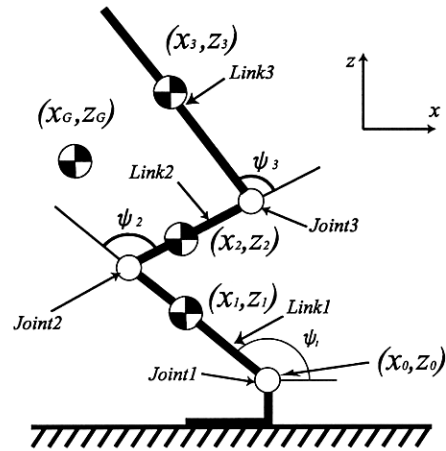


Fig. 2 Simulation model

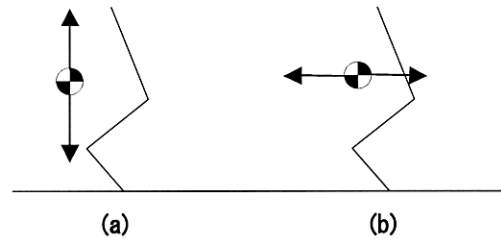


Fig. 3 CG (Center of Gravity) Control (a) $\lambda_x = 0, \lambda_z \neq 0, P_G = 0$  (b) $\lambda_x \neq 0, \lambda_z = 0, P_G = 0$

は床反力を表している。式(1)の第二式は拘束条件( $x_0 = 0, z_0 - h = 0$ ( $h$ は足首高さ))から導かれる速度拘束式である。式(1)は足が床に接地している状態の運動方程式を記述しているが、浮遊期のダイナミクスは $\lambda = 0$ とすることにより得られる。

## 3. 目標ダイナミクスに基づく床運動制御

### 3.1 運動方程式の変換

本節では目標ダイナミクスに基づく制御について説明する。高速な運動を行うとき、時間軌道追従では誤差がどんどん大きくなり、特にその運動が繰り返されるときには大きな問題となる。そこで、軌道に追従するのではなく、ある目標ダイナミクス(参照モデル)を設定しフィードバックによってモデル追従を行うというのが本方法の基本的な考え方である。足首を基準とした運動方程式は式(1)であるが、重心を直接扱うために、一般化座標に重心の座標を含んだ状態変数を考え、運動方程式を書

き換えると

$$\begin{aligned} J_G(q_G)\dot{q}_G + H_G(q_G, q_G) &= u + E_G(q_G)^T \lambda_G \\ E_G(q_G)\dot{q}_G &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

という形になる.実は上式は,次のような構造を持っている.

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_G &= \lambda_{GX} \\ m\ddot{z}_G &= \lambda_{GZ} - mg \\ J_{G22} \begin{bmatrix} \ddot{\psi}_1 \\ \ddot{\psi}_2 \\ \ddot{\psi}_3 \end{bmatrix} + H_{G2} &= \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} - \frac{1}{m} J_{12}^T \begin{bmatrix} \lambda_{G\psi_1} \\ \lambda_{G\psi_2} \\ \lambda_{G\psi_3} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

$J_{G22}$ は $J_G$ の右下 $3 \times 3$ 行列,  $H_{G2}$ は $H_G$ の下 $3 \times 1$ 行列,  $J_{12}$ は式(1)の $J$ の右上 $2 \times 3$ 行列である.このとき,重心の並進運動( $x, z$ 方向)と回転運動が分離されていることが分かる.なお,床反力は

$$\lambda_G = (E_G J_G^{-1} E_G^T)^{-1} \left( \frac{\partial E_G}{\partial q_G} \dot{q}_G^2 - E_G J_G^{-1} (u - H_G) \right) \quad (4)$$

のように $u$ の関数となっているため, $u$ から $\lambda_G$ を経て,重心の位置 $x_G, z_G$ を直接制御できることが分かる.

### 3.2 目標ダイナミクスの設計

式(3)で $x_G, z_G$ を直接扱えることを示したが, $x_G, z_G$ だけでは回転を伴う床運動を制御し難いので,大局的な回転運動を規定する物理量をもうひとつ導入する.その物理量は重心周りの角運動量である.特に,後で述べる後転跳びなど回転を伴う運動制御においてはこれを直接制御するメリットは大きい. $x_G, z_G, P_G$ の3つ制御量を3つの制御入力 $\tau$ で制御するわけである.角運動量は

$$P_G = J_{G1}(\psi)\dot{\psi}_1 + J_{G2}(\psi)\dot{\psi}_2 + J_{G3}(\psi)\dot{\psi}_3 \quad (5)$$

( $\psi = [\psi_1, \psi_2, \psi_3]$ ,  $J_{G1}(q), J_{G2}(q), J_{G3}(q)$ :慣性係数)と表される.これを微分すると,

$$\dot{P}_G = J_{G1}(\psi)\ddot{\psi}_1 + J_{G2}(\psi)\ddot{\psi}_2 + J_{G3}(\psi)\ddot{\psi}_3 + f(\dot{\psi}, \psi) \quad (6)$$

となり, $\dot{q}_G$ が現れるので,これと式(2)と式(4)から,制御入力 $u$ が求まる.目標ダイナミクスに基づいた制御の簡単な例を示すとFig.3のようになる.この例では,(a) $\lambda_x = 0$ で $\lambda_z \neq 0$ ,  $P_G = 0$ のときには垂直な運動を行うことになり,(b) $\lambda_x \neq 0$ で $\lambda_z = 0$ ,  $P_G = 0$ のときは水平な運動を行うといえる.後転跳びや宙返りを行うためには $P_G$ に任意の値を与え

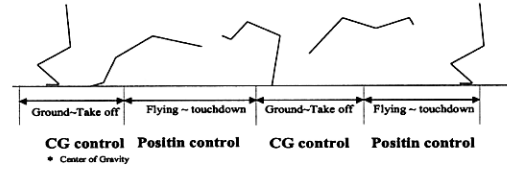


Fig. 4 Scheme for back handspring

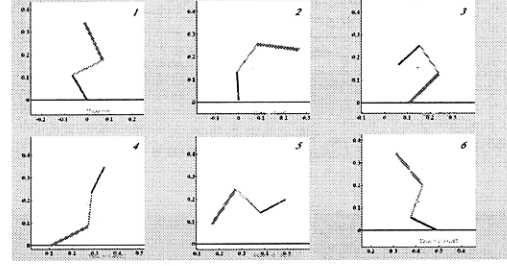


Fig. 5 Back handspring in simulation

ればよい.具体的に後転跳びの場合は $X$ 方向は等加速度運動, $Z$ 方向はばね運動をさせ,それと同時に重心周りの角運動量のある値に収束させる制御を行う.

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_G &= C \\ m\ddot{z}_G &= k(z_G - z_0) - mg \\ \dot{P}_G &= k_p(P_G - P_{Gd}) \end{aligned} \quad (7)$$

$C$ は任意の一定値,  $k$ は仮想ばね定数, $z_{G0}$ は仮想平衡点,  $P_{Gd}$ は目標角運動量,  $k_p$ はゲインである.

なお,池田らは,同様の手法により走行運動を試みている<sup>3)</sup>.

## 4. シミュレーション例

### 4.1 垂直跳び

最も簡単な運動として垂直跳びを行う.式(7)において,  $C = 0$ ,  $P_{Gd} = 0$ ,  $Z$ 方向のばね運動になる.

### 4.2 後転跳び

垂直跳びを応用して,後転跳びを行う.本稿では,  $C=4.5$ ,  $k = 50$ ,  $z_{G0} = 0.19$ ,  $P_{Gd} = -6.4z_G$ のように設定した.また,空中では次の接地期の制御に有利な姿勢を目標姿勢とする位置制御を行うものとする.つまり,一回の運動においてFig.4のような制御の切り替えを行うことになる. Fig.5に結果を示す.このときの関節角度曲線と関節トルク曲線をFig.6に示す.

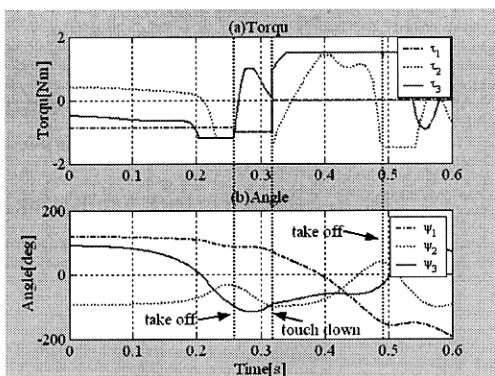


Fig. 6 Angle/Torque trajectory in simulation result

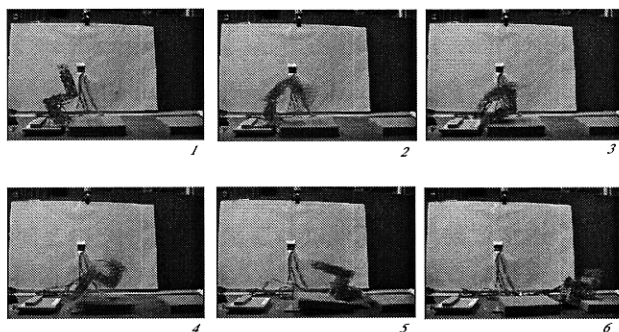


Fig. 7 Experimental result

制御パラメータ  $C, k, k_p, P_{Gd}$  や浮遊期における目標姿勢の決定は現在のところ trial and error であるため今後、合理的な定式化を行う。

## 5. 実験

本節では、製作した実機において後転跳びの実験を行った結果を示す。今回の実験では、姿勢センサを用いてないので、暫定的にシミュレーションによって得られた関節トルク軌道を与えることにより運動を行っている。ただし、リアルタイム計算も可能であることを確認している。ロボットの動きを、Fig.7に示す。また、Fig.8に実験とシミュレーションの関節トルクを比較した結果を、Fig.9には関節角度を比較した結果を示している。

## 6. 結論

本稿では、目標ダイナミクスに基づく床運動制御を提案し、その有効性をシミュレーションより確認した。実機においても後転跳びが成功することが確認できた。軌道追従方法では、衝突などの外乱により目標とする運動から大きくずれること

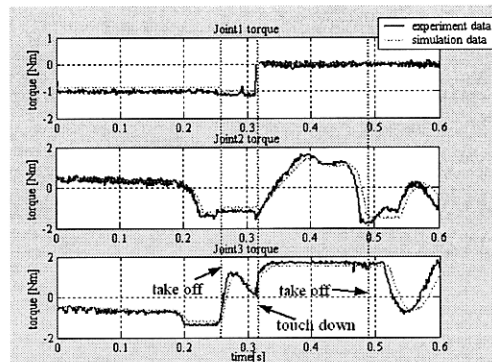


Fig. 8 Experimental result

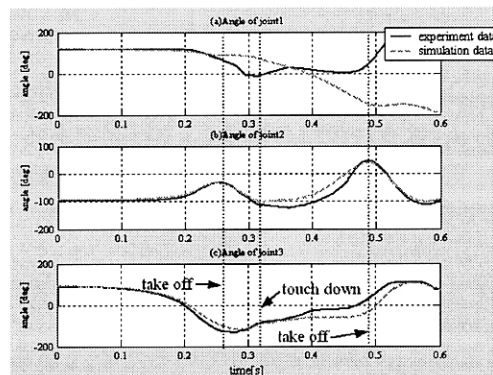


Fig. 9 Experimental result

が容易に予想される。単発的な運動であれば問題ない場合もあるが、長時間にわたって運動を行うときは本稿のように目標ダイナミクスに基づいてリアルタイムにモデル追従することが有効であると考えられる。今後は姿勢センサ、リアルタイム制御の実装による連続的な床運動の実現、更に目標ダイナミクスと制御パラメータの設計法について考えていきたい。

## 参考文献

- 1) J.K.Hodgins, M.H.Raibert : " Biped Gymnastics ", The International Journal of Robotics Research, Vol.9, No.2 pp.115 - 132 1990
- 2) 有川, 美多 : "多自由度跳躍ロボットの設計 — 基本設計と計算機シミュレーション —", 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.2, pp214 - 222, 2002
- 3) 池田, 美多 : "脚式ロボットの走行制御 — 動物の運動解析に基づく走行の実現 —", システム制御情報学会論文誌, Vol.14, No.5, pp233 - 243, 2001