

# 1自由度脚ロボットの跳躍パターン解析

## Analysis on Jumping Patterns of 1-DOF Legged Robot

正 妹尾 拓 (東大) 丹野 優一 (東大) 正 石川 正俊 (東大)

Taku SENOO, University of Tokyo, Taku.Seno@ipc.i.u-tokyo.ac.jp

Yuichi TANNO, University of Tokyo Masatoshi ISHIKAWA, University of Tokyo

In this paper we report on experiments on jumping motion using a 1-DOF legged robot. First the dynamics and basic characteristics of the 1-DOF legged robot are derived. Three jumping patterns based on the sliding contact between the leg and the ground are represented. In particular two-step jumping method is newly proposed, which is effective for high-speed and powerful actuator. Next the influence of structural parameters of the legged robot on jumping motion is analyzed. It has proven that the optimal parameters for high jump exist.

**Key Words:** legged robot, jumping pattern, two-step jumping

### 1. はじめに

脚制御によるロボットの歩行能力が、近年目覚ましい発展を遂げている。ヒューマノイドによる腕の作業を想定したZMP解析なども研究され[1]、これまで独立に進歩してきた脚と腕の技能の協調の重要性が今後はより一層増すと予想される。腕に関しては、高速バタニング[2]や瞬間的なリグラスピング[3]など、ダイナミックな運動性能が実現されている。このような腕の潜在能力を脚制御と統合して発揮するためには、脚ロボットに関しても同様なアプローチで運動能力を追求していくことが望ましい。

脚を用いたダイナミックな運動として跳躍動作がある。Playerらは空気バネを用いた2脚ロボットで宙返りを実現している[4]。従来は十分な跳躍高さを達成するのに小型でパワーのあるアクチュエータがなかったため、瞬発力の高い圧縮空気やスプリング等を用いた跳躍に特化したメカニズムがほとんどであった。近年ではサーボモータの性能が向上し、跳躍動作を含めて汎用的な脚運動をおこなえるロボットが実現可能になりつつある。有川らはDCモータで構成された多自由度跳躍ロボットを取り上げ、設計パラメータの条件次第で後方宙返りが可能であることを数値シミュレーションで示している[5]。東森らはエネルギー収支の観点から跳躍高さを解析をおこない、小型かつトルク重量比の高いモータを用いて実機による跳躍動作を実現している[6]。

本稿ではダイナミックな脚運動の実現に向けて、2脚を有する1自由度ロボットの跳躍動作について解析する。始めにロボットのダイナミクスとその基本的な特徴について導出し、跳躍パターンについて分類する。ここでは新たに跳躍直後に地面を蹴って上昇速度を増加する二段ジャンプについて提案する。続いてロボットの構造パラメータ変化に対する跳躍高さについてシミュレーションをおこない、各跳躍パターンが有効となる領域を考察する。最後に実験結果を述べ、シミュレーションとの比較をおこなう。

### 2. 1自由度脚ロボット

本稿で取り扱う1自由度脚ロボットは、東森らが扱っているTracing Typeの跳躍ロボット[6]と類型である。相違点は、ダイナミクスの導出およびそれに基づく跳躍戦略を提案している

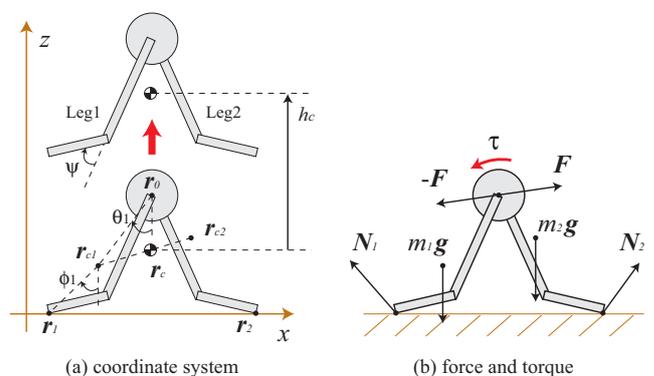


Fig. 1 1-DOF legged robot model

点、直線形状に限らず折線形状の脚について考察している点、新しい跳躍方法として二段ジャンプを提案している点である。

#### 2.1 1自由度2脚ロボットモデル

2つの脚を有する1自由度ロボットについて考える。1つの脚(Leg1)と他方の脚(Leg2)が回転関節で接続されていて、Leg1を回転モータにより駆動し、Leg2がその反作用で駆動される。ロボットは剛体であり、各脚は床とそれぞれ1点で接するとする。図1(a)のように基準座標 $\Sigma_O$ の $x$ 軸は水平な床面、 $z$ 軸は鉛直方向に設定し、2次元平面内の運動を考える。

ロボットに働く力とモーメントを図1(b)に示す。このとき並進運動の方程式は以下のように記述される。

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{r}_{c1} &= m_1 g + F + N_1 \\ m_2 \ddot{r}_{c2} &= m_2 g - F + N_2 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで $m_i$ はLeg $i$ の質量、 $r_{ci}$ はLeg $i$ の重心位置、 $g = [0, -g]^T$ は重力、 $F$ はLeg1からLeg2に働く内力、 $N_i$ はLeg $i$ に働く床反力を表している。Leg1に働くトルクを $\tau$ とすると、各脚の重心における回転運動の方程式は以下のように記述される。

$$\begin{aligned} I_1 \dot{\omega}_1 &= \tau + (r_0 - r_{c1}) \times F + (r_1 - r_{c1}) \times N_1 - k(\omega_1 - \omega_2) \\ I_2 \dot{\omega}_2 &= -\tau + (r_0 - r_{c2}) \times (-F) + (r_2 - r_{c2}) \times N_2 \\ &\quad + k(\omega_1 - \omega_2) \end{aligned} \quad (2)$$

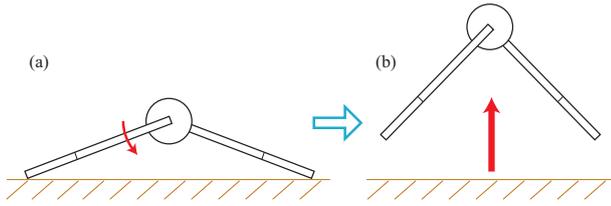


Fig. 2 One-step jumping (straight leg)

ここで  $I_i$  は Leg  $i$  の重心周りの慣性モーメント,  $\omega_i$  は Leg  $i$  の角速度,  $r_0$  は回転関節位置,  $r_i$  は Leg  $i$  と床との接触点,  $k$  は関節の粘性摩擦係数を表している. また  $a = [a_1, a_2]^T$ ,  $b = [b_1, b_2]^T$  のとき  $a \times b \equiv a_1 b_2 - a_2 b_1$  と定義し, 回転を表す変数の符号は反時計回りを正とする.

1 自由度で 2 脚を制御するメカニズムのため, ロボット脚上の床との接触点は滑り運動となる. そのため床反力は垂直抗力と滑り摩擦力に分解でき, 両脚とも内側に滑り運動をおこなうときは  $N_1 = [N_{1x}, N_{1z}]^T = [-\mu N_{1z}, N_{1z}]^T$ ,  $N_2 = [N_{2x}, N_{2z}]^T = [\mu N_{2z}, N_{2z}]^T$  となる. ここで  $\mu$  は滑り摩擦係数であり, 添え字  $x, z$  はその変数の  $x$  成分と  $z$  成分を表している. ロボット全体の重心位置を  $r_c \equiv (m_1 r_{c1} + m_2 r_{c2}) / (m_1 + m_2)$  とすると, 内力と床反力は重心運動を用いて次式で表される.

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{\mu}{2} \left\{ m_1 \left( \frac{\ddot{r}_{c1x}}{\mu} + \ddot{r}_{cz} + g \right) + m_2 \left( -\frac{\ddot{r}_{c2x}}{\mu} + \ddot{r}_{cz} + g \right) \right\} \\ F_z &= \frac{1}{2} \left\{ m_1 \left( \frac{\ddot{r}_{cx}}{\mu} + \ddot{r}_{c1z} + g \right) - m_2 \left( -\frac{\ddot{r}_{cx}}{\mu} + \ddot{r}_{c2z} + g \right) \right\} \\ N_{1z} &= \frac{1}{2} (m_1 + m_2) \left( -\frac{\ddot{r}_{cx}}{\mu} + \ddot{r}_{cz} + g \right) \\ N_{2z} &= \frac{1}{2} (m_1 + m_2) \left( \frac{\ddot{r}_{cx}}{\mu} + \ddot{r}_{cz} + g \right) \end{aligned} \quad (3)$$

垂直抗力が 0 になる瞬間にロボットが床から離れるので, 式 (3) より各脚の跳躍タイミングはロボット全体の重心加速度によって決定されることがわかる.

各脚の重心から回転関節までの距離  $l_{i1} \equiv \|r_0 - r_{ci}\|$  は定数であるが, 各脚の重心から床との接触点までの距離  $l_{i2} \equiv \|r_i - r_{ci}\|$  は脚の回転角により変化する. これはロボット脚上の接触点の移動に起因するものであり, 折線脚では不連続に, 曲線脚では連続に変化する.  $l_{i1}, l_{i2}$  の方向が  $z$  軸となす角度を  $\theta_i, \phi_i$  とすると, 折線脚の場合の重心位置と加速度は次式となる.

$$\begin{aligned} r_{cix} &= l_{i1} S_{\theta_i} + r_{0x}, \quad \ddot{r}_{cix} = l_{i1} \mathbf{R}_{\theta_i} \times \boldsymbol{\alpha}_{\theta_i} + \ddot{r}_{0x} \\ r_{ciz} &= l_{i2} C_{\phi_i}, \quad \ddot{r}_{ciz} = l_{i2} \mathbf{R}_{(\phi_i + \frac{\pi}{2})} \times \boldsymbol{\alpha}_{\phi_i} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで  $S_q \equiv \sin q$ ,  $C_q \equiv \cos q$ ,  $\mathbf{R}_q \equiv [C_q, S_q]^T$ ,  $\boldsymbol{\alpha}_q \equiv [\dot{q}^2, \ddot{q}]^T$  と定義する. また式 (2)(3) より  $\ddot{r}_{0x}$  は次式で表される.

$$\begin{aligned} \ddot{r}_{0x} &= \left\{ \frac{1}{2\mu} (r_{2x} - r_{1x}) + r_{cz} \right\}^{-1} \left[ (m_1 + m_2)^{-1} \{ I_1 \dot{\omega}_1 + I_2 \dot{\omega}_2 \right. \\ &\quad \left. - m_1 \ddot{r}'_{c1} \times r'_{c1} - m_2 \ddot{r}'_{c2} \times r'_{c2} \right] \\ &\quad - \left[ \frac{1}{2\mu} (r_{2x} - r_{1x}) \ddot{r}'_{cx} + (r_{px} - r_{0x}) \ddot{r}_{cz} + (r_{px} - r_{cx}) g \right] \end{aligned} \quad (5)$$

ここで  $r_{px} \equiv \frac{1}{2} (r_{1x} + r_{2x})$  は接触点の midpoint, 添え字  $'$  は原点を  $[r_{0x}, 0]^T$  に設定した座標系  $\Sigma_L$  で表現した値を表している.

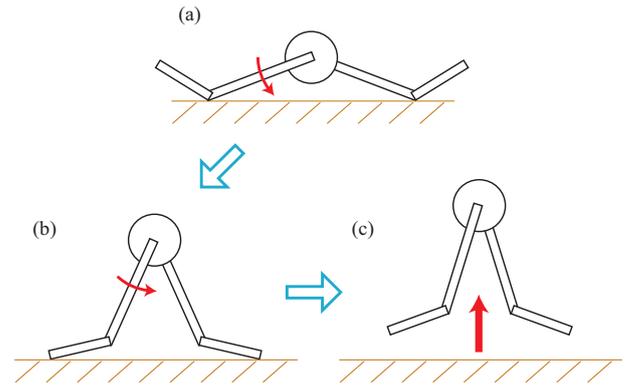


Fig. 3 One-step jumping (bending leg)

## 2.2 鏡像対称脚構造のダイナミクス

本稿では, 図 1 のように鏡像対称構造を持った脚ロボットについて考える. ここでは形状パラメータだけではなく, 動力学パラメータも対称性を持つとする. この条件より  $N_{1z} = N_{2z}$  が成り立つので, 跳躍開始のタイミングは両脚同時となる.

このとき  $\theta_1$  で表現したダイナミクスは次式となる.

$$\tau = M_1 \ddot{\theta}_1 + H_1 \dot{\theta}_1^2 + G_1 + 2k\dot{\theta}_1 \quad (6)$$

ここで  $M_1$  は慣性項,  $H_1$  遠心力項,  $G_1$  は重力項であり, 具体的には以下ようになる.

$$\begin{aligned} M_1 &= I_1 + m_1 [-l_{12} S_{\phi_1} \{ \mu C_{\theta_1} (l_{11} + l_{12}) + l_{12} S_{\theta_1} \} \\ &\quad + l_{11}^2 C_{\theta_1}^2] \\ H_1 &= -m_1 [l_{12} C_{\phi_1} \{ \mu C_{\theta_1} (l_{11} + l_{12}) + l_{12} S_{\theta_1} \} \\ &\quad + l_{11}^2 C_{\theta_1} S_{\theta_1}] \\ G_1 &= m_1 g \{ \mu C_{\theta_1} (l_{11} + l_{12}) + l_{12} S_{\theta_1} \} \end{aligned} \quad (7)$$

対称性より  $\theta_1 = -\theta_2$  が成立しているので, Leg2 についても同様の運動となる.

## 2.3 跳躍高さ

跳躍後の空中相において働く外力は重力のみなので, 重心軌道は放物線を描く. 跳躍を開始する時刻を  $t_j$  とすると, 跳躍開始時の重心高さを基準とした跳躍高さ  $h_c$  は以下の式で表される.

$$h_c(t) = -\frac{1}{2} g (t - t_j)^2 + \dot{r}_{cz}(t_j) (t - t_j) \quad (8)$$

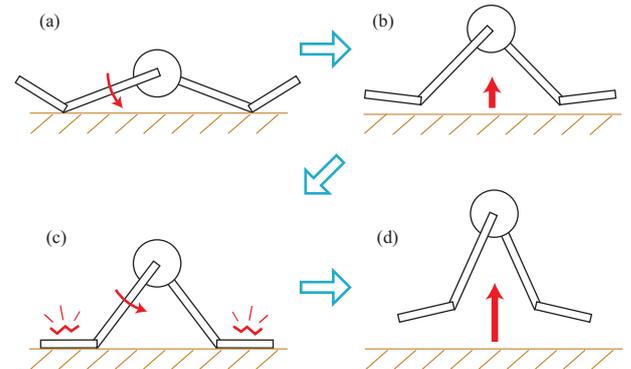


Fig. 4 Two-step jumping

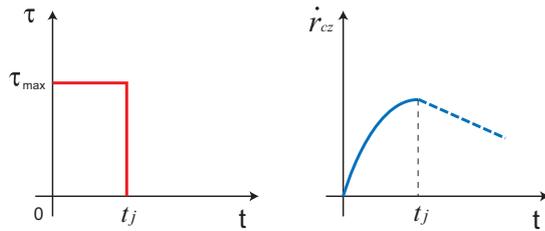


Fig. 5 Input of torque and vertical velocity ( $\psi = 0$ )

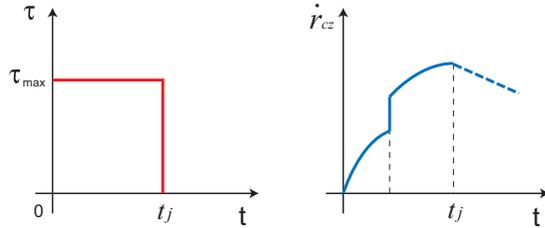


Fig. 6 Input of torque and vertical velocity ( $\psi \neq 0$ )

最高跳躍到達時刻  $t_{\max}$  では  $\dot{h}_c = 0$  を満たすので、 $t_{\max} = t_j + \dot{r}_{cz}(t_j)/g$  として計算される。これより最高跳躍高さ  $h_{\max}$  は以下の式で表される。

$$h_{\max} = h_c(t_{\max}) = \frac{\dot{r}_{cz}(t_j)^2}{2g} \quad (9)$$

したがって、跳躍高さは跳躍開始時における重心速度の鉛直成分で決まることになる。

### 3. 跳躍動作

本章では、折線脚の上腿と下腿がなす角度  $\psi$  に着目して跳躍戦略および跳躍高さについて考察をおこなう。

#### 3.1 跳躍パターン

足裏を床と相対的に固定して跳躍する通常の方法とは異なり、接触点を移動して滑りながら跳躍するパターンについて以下の3種類を考え跳躍高さについて考察する。

1つ目は直線脚 ( $\psi = 0$ ) の一段ジャンプであり、図2のように脚を開いた状態から閉じるようにトルクを加えて空中に飛び上がる方法である。2つ目は折線脚 ( $\psi \neq 0$ ) の一段ジャンプであり、図3のようにロボット脚における床との接触点が不連続に変化することが特徴である。3つ目は二段ジャンプであり、図4のように一度跳躍して空中に浮いた直後に脚を回転させて床と衝突して、上昇速度を増加させる方法である。

#### 3.2 跳躍戦略

式(9)より、跳躍時の鉛直速度  $\dot{r}_{cz}(t_j)$  が跳躍高さを決定する。脚を閉じるほど回転速度が鉛直成分よりも水平成分に大きく寄与するため、跳躍姿勢としては脚を開いた状態の方がより好ましい。つまり高く跳躍するためには、短時間で加速をおこない早い段階で最高鉛直速度が出現することが重要である。多自由度ロボットのように関節間の相互干渉がないため、跳躍するまではトルク最大値  $\tau_{\max}$  を入力し続けることにする。

初速度0から運動を開始すると鉛直速度の時系列曲線は極大値を持つカーブを描く。鉛直速度が最大するとき、つまり  $\ddot{r}_{cz} = 0$  のときに跳躍するのがよい。一方、式(3)より実際に跳躍を開始するのは  $\ddot{r}_{cz} < -9.8$  を満たすときなので、鉛直速度の減少

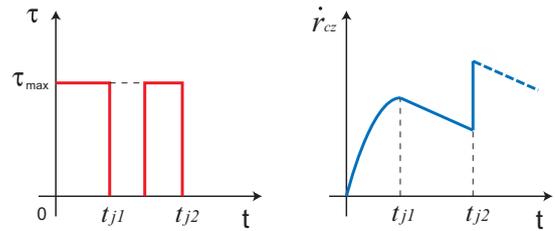


Fig. 7 Input of torque and vertical velocity (two-step jumping)

を抑えるために短時間で急停止して跳躍する方法を採用する。理想的には  $\ddot{r}_{cz} = 0$  を満たす時刻に瞬時に回転関節の運動が停止して  $\ddot{r}_{cz} < 0$  を満たし、最高速度の状態から跳躍の開始が可能となる。本実験で用いるモータも粘性が強いので、トルク入力を0にした瞬間に回転が停止する理想状態に従うと仮定し、鉛直速度が最大の地点でトルク入力を0に切り替える。

3.2-1 一段ジャンプ (直線脚) 式(6)を用いて  $\dot{r}_{cz}(t_j) = 0$  を満たすように跳躍開始時刻  $t_j$  を決定する。この方程式は解析的に解くことができないので、実験では事前にシミュレーションで計算した値を用いることにする。図5にトルク入力と鉛直速度の時間応答を示す。空中では重力によって鉛直速度の傾きが  $-g$  で減少する。

3.2-2 一段ジャンプ (折線脚) 直線脚との違いはロボット脚上の床との接触点が変わることである。接触点が変わる前後において関節の回転速度  $\dot{\theta}_1$  が連続に変化すると仮定すると、重心速度に関しては不連続に変化する。その変化量は  $\psi < \pi/2$  の場合には図6のように変化前に比べて増加するので、跳躍にとっては有利となる。鉛直速度の極大値が現れる前に接触点が変わる場合は、必ず移動後に最大値が存在するのでその時刻で跳躍を開始することにする。一方、極大値の出現後に接触点が変わる場合は、移動前後で最大値を比較して速度の大きい時刻で跳躍を開始することにする。移動前の極大値が大きい場合の跳躍方法は直線脚の一段ジャンプと同一となる。

3.2-3 二段ジャンプ ロボット脚上の床との接触点が変わる前において、鉛直速度が極大の状態から一度跳躍をおこなうことにする。空中で再度トルク最大値を入力して脚を回転させ、図4(c)のように下腿が床に水平になる姿勢で脚を衝突させることを考える。空中でのダイナミクスは床反力が働かない状態、つまり  $N_i = 0$  を代入することで得られる。このダイナ

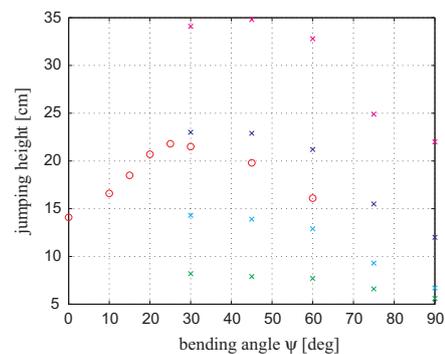


Fig. 8 Simulation result of jumping height to bending angle



Fig. 9 1-DOF legged robot

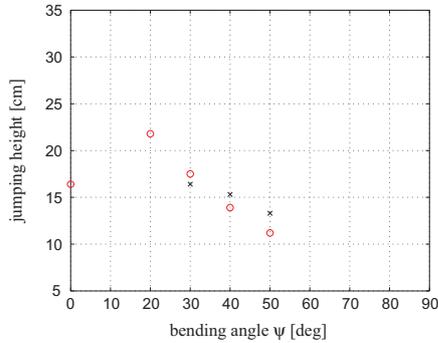


Fig. 10 Experimental result of jumping height to bending angle

ミクスと衝突姿勢から2回目のトルク入力時刻と衝突時刻  $t_{j2}$  を計算することができる。図7からわかるとおり、一度目の跳躍状態 ( $t_{j1} < t < t_{j2}$ ) を短時間にするのが鉛直速度の減少を抑えるので、脚を高速に回転できるアクチュエータにとっては有利な跳躍方法となりうる。衝突は非完全弾性衝突として反発係数  $e$  を導入し、衝突後の重心速度を計算する。

### 3.3 跳躍シミュレーション

パラメータ  $\psi$  に対する最高跳躍高さ  $h_{max}$  をシミュレーションした。その結果を図8に示す。特徴としては  $\psi = 25$  [deg] 付近に一段ジャンプ (印) の極大値が存在することである。他の条件が等しいときには脚の有効長 (回転中心から接触点までの長さ) が長いほど重心速度も大きくなるが、折線脚では接触点に移行する際に接触点に対する各脚の重心位置が内側かつ高めに移動するため、脚を加速しやすくなるのが鉛直速度を増加させる要因となる。一方、パラメータ  $\psi$  を大きくしすぎると脚の有効長も短くなると同時に慣性モーメントが大きくなって鉛直速度が減少すると考えられる。

また、反発係数によっては二段ジャンプ (×印) の方が一段ジャンプより高く跳躍できることがわかる。二段ジャンプに関しても一段ジャンプと同様に  $\psi$  を大きくしすぎると跳躍高さは減少することがわかる。また  $\psi < 30$  [deg] では鉛直速度の極大値が出現する前に接触点が変わるため、二段ジャンプがおこなえない領域となっている。

## 4. 実験

### 4.1 実験設定

図9に1自由度脚口ロボットの写真を示す。Leg1をモータの軸に取り付け、Leg2をモータの胴体に固定してある。モータは質量66[g]で最大トルク0.9[Nm]である小型軽量アクチュエータを用いた。パラメータ  $\psi$  は  $\psi = 0, 20, 30, 40, 50$  [deg] で実験した。脚の材質はアルミニウムであり、折線脚の上腿の長さは20[cm]で下腿の長さは8[cm]である。初期姿勢は上腿を水平に広げた状態とし、初速度0で運動を開始する。



Fig. 11 Serial photographs of two-step jumping

### 4.2 実験結果

パラメータ  $\psi$  に対する跳躍高さの関係を図10に示す。シミュレーション結果の図8と比較すると、跳躍高さの極大値が存在すること、および二段ジャンプの方が高く跳躍できる領域があることの2つの傾向が再現できていることがわかる。シミュレーションとの差異の原因は、衝突モデルの単純化とパラメータの設定誤差 (粘性摩擦や滑り摩擦) が挙げられる。

図11に  $\psi = 40$  [deg] のときの二段ジャンプの連続写真を30[ms]間隔で示す。一度空中に跳躍した直後に、脚を床と衝突させて再度ジャンプしている様子が見られる。

## 5. まとめ

1自由度2脚口ロボットのダイナミクスを導出し、跳躍パターンについて解析をおこなった。今後の課題は、曲線脚への拡張や空中での姿勢制御などダイナミックな脚運動を実現していくことである。

## 文献

- [1] 原田, 梶田, 金広, 藤原, 金子, 横井, 比留川. ヒューマノイドロボットの脚腕協調における ZMP 解析. 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.1, pp.28-36, 2004.
- [2] 妹尾, 並木, 石川. 高速打撃動作における多関節マニピュレータのハイブリッド軌道生成. 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.4, pp.515-522, 2006.
- [3] N. Furukawa, A. Namiki, T. Senoo and M. Ishikawa. Dynamic Regrasping Using a High-speed Multifingered Hand and a High-speed Vision System. Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.181-187, 2006.
- [4] R. R. Player and M. H. Raibert. Control of a Biped Somersault in 3D. Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.582-589, 1992.
- [5] 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, pp.214-222, 2002.
- [6] M. Higashimori, M. Harada, M. Yuya, I. Ishii and M. Kaneko. Dimensional Analysis Based Design on Tracing Type Legged Robots. Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.181-187, 2005.