

# ヒューマノイドロボットの動的起き上がり運動の理解と実現

(大阪大学大学院工学研究科) 大賀 淳一郎, 荻野 正樹  
(大阪大学大学院工学研究科, 阪大 FRC) 細田 耕, 浅田 稔

## 1 はじめに

ヒューマノイドロボットは人間の生活環境においてさまざまな活動を行う存在としての期待が高まっている。人間の代わりとして、または人間と共同して仕事を行うためには安定した2足歩行をすることが求められ、これまでの研究では、倒れずに歩き続けることが注目されてきた。しかし不確実性の高い実世界においては、倒れないことよりも、倒れても起き上がることができることがより重要であると考えられる。

起き上がり行動を実現するために、静的につりあいを取りながら起き上がることも考えられる<sup>1)</sup>が、動特性を生かして起き上がることができれば、より少ない自由度あるいはモータ出力で、起き上がり行動ができると期待される。動的な起き上がりに関しては、階層型強化学習による3リンク2関節ロボットの起立行動の獲得<sup>2)</sup>や、脚の振り降ろしを利用した4リンク3関節の一脚ロボットによる起き上がり運動<sup>3)</sup>などが報告されている。これらの方法は、平坦な背中での起き上がりを考えており、起き上がりの際に生じる衝突によるエネルギー損失が大きくなることが予想される。

本報告では、人間型ロボットの動的起き上がりを、平坦な背中のままで実現可能かどうかをシミュレーションによって実験し、起き上がり運動に必要な条件について考察する。さらに制限条件によって平坦な背中のままでは起き上がることのできないロボットに対しては、ロボットに丸い背中を実装することによって起き上がり運動を実現する。これは、丸い背中を装備することによって着地時の衝撃を減らすことができるため、より少ないエネルギーで起き上がることができると考えられるからである。背中の形状をシミュレーションによって検討し、実際のロボットに実装して、起き上がりを実現できることを実験的に確認した。

## 2 平坦な背中での動的起き上がり

起き上がり運動には多くの種類が存在するが、本報告では脚を振り降ろすときのモーメントを利用する動的な起き上がり運動の実現を目指す。

### 2.1 ロボットのモデル

ほとんどのヒューマノイドロボットの背中では平坦であるので、図1のようにヒューマノイドロボットをモデル化する。

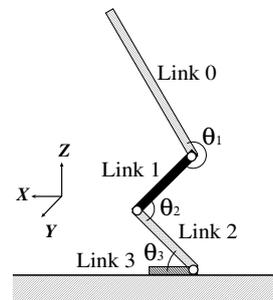


図1: ロボットのモデル

ここで $\theta_i (i = 1, 2, 3)$ はそれぞれ腰、膝、足首関節の関節角である。また、進行方向を $X$ 軸、鉛直方向を $Z$ 軸としている。

### 2.2 制御上の仮定

起き上がるための条件を考察するに当たり、以下のような仮定をおくことにした。

1. 矢状面内の運動に限定する。
2. それぞれの脚のモータはPD制御でコントロールし、速度台形則で関節角軌道を算出する。速度

台形則では速度関数が連続しているが、少なくとも加速，等速，減速 3 つの場合分けが必要であるので，計算量を減らすために加速時間と減速時間を同じ長さに設定する．駆動時間  $T$  は

$$T = \frac{b - a}{\dot{\theta}_{max}} + \Delta T \quad (1)$$

となる．ただし，初期時刻における関節角度を  $a$ ，終端時刻における関節角度を  $b$ ，最大角速度を  $\dot{\theta}_{max}$ ，加速時間 (= 減速時間) を  $\Delta T$  とする．

3. モータの最大角速度は  $\dot{\theta}_{max}$  であり，予め分かっている．ここで加速時間を決めると，駆動時間  $T$  は初期時刻の関節角度と終端時刻の関節角度の変化量に依存する．

表 1: ロボットのモデルのパラメータ

link	length [m]	weight [kg]	inertia [kg m <sup>2</sup> ]
Link0	0.31	0.76	$6.09 \times 10^{-3}$
Link1	0.15	0.16	$3.00 \times 10^{-4}$
Link2	0.13	0.38	$5.35 \times 10^{-4}$
Link3	0.01	0.11	$8.33 \times 10^{-8}$

joint	range[rad]
hip	2.95 ~ 5.94
knee	0.35 ~ 3.33
ankle	1.57 ~ 4.71

### 2.3 起き上がり運動のための条件

上体が起き上がる時の回転中心は腰関節であるが，足先が床面と衝突した後の回転中心は足裏に移動する．この回転中心の移動距離が小さいほど，衝撃時に散逸するエネルギー  $E_{imp}$  を抑えることができる．回転中心の移動距離を小さくするには

- 関節角の可動範囲を広くすることで，しゃがんだ姿勢のときの足先位置を腰関節に近づける
- 足先と床面の衝撃を小さくするため， $l_1 \geq l_2$  とする．(ただし  $l_k$  は図 1 における Link  $k$  の長さ)

とすればよいと考えられる．

### 2.4 シミュレーションによる実験

起き上がり運動が実現できるかどうかをシミュレーションで検証した．用いたシミュレーションでは，リンクのダイナミクス計算，床との摩擦，衝突計算，それぞれの関節のサーボの計算を行うことができる．シミュレーションに用いるロボットのモデルのパラメータを表 1 に示す．また，各関節可動範囲はそれぞれ次のようにした．シミュレーション上において各関節に設計された軌道を追従させて，起き上がり運動を実現できたようすを図 2 に示す．図 2 を見ると約 1 秒で脚を振り降りしゃがんだ姿勢で脚を深く曲げて，足裏に体重が載っているのが分かる．また，シミュレーションで得られたエネルギーと仕事率の時間変化をそれぞれ図 3, 4 に示す．ここで，図 3 の  $\Delta U$  はロボットのリンクの持つ現在のポテンシャルエネルギーから初期

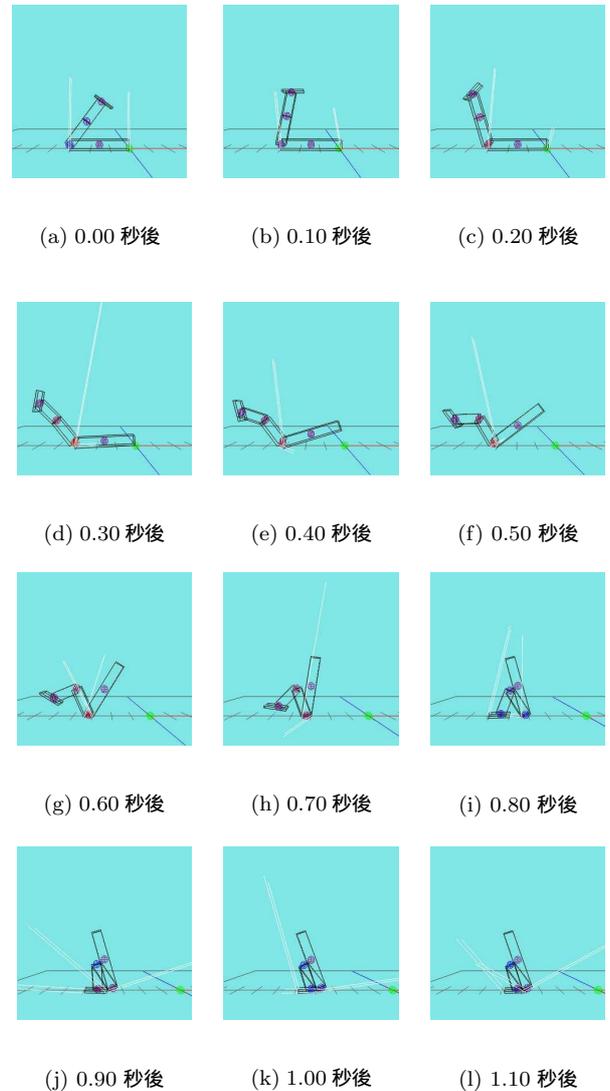


図 2: シミュレーション上での起き上がり運動

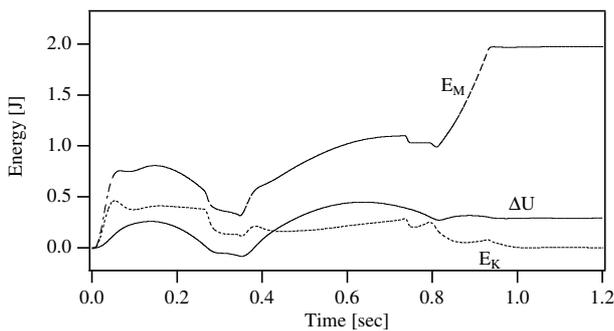


図 3: シミュレーション上での起き上がり運動中のエネルギー変化の様子

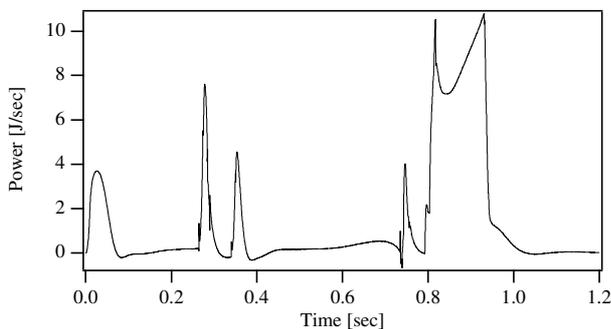


図 4: シミュレーション上での起き上がり運動中の仕事率の様子

状態のポテンシャルエネルギーを引いたもの、 $E_K$  はリンクの重心の並進運動エネルギーと重心回りの回転エネルギーの和、 $E_M$  は以下のようにして計算されるモータによって与えられたエネルギーである。

$$E_M = \int_0^t \tau \dot{\theta} dt \quad (2)$$

また、図 4 は

$$Power = \frac{d}{dt} (E_M - \Delta U - E_K) \quad (3)$$

を表している。

図 2 と合わせて見てみると、足先が床面と衝突する瞬間以降 ( $t = 0.8 \sim [\text{sec}]$ ) から運動エネルギーが減少し始めているのが読みとれる。このときポテンシャルエネルギーはさほど大きく変化していないことから、衝撃によってエネルギーが散逸したと考えられる。

また、 $0.0 < t < 0.1$  や  $t = 0.3$  付近などで  $Power$  が増加しているのはリンクを動かす時と止める時に急激に加速、あるいは減速するために衝撃が生じているためである。

## 2.5 平坦な背中による起き上がり運動の考察

今回のシミュレーションでは関節可動範囲がかなり大きいので、足先と腰関節の距離を小さくすることができ、スムーズに回転中心を移動させることができた。しかし、関節の可動範囲が狭いなど、先の実験条件を充たすことができないロボットにおいては、起き上がり運動を実現することが非常に難しいと思われる。そこで次に丸い背中をロボットに装着した場合の動的起き上がりについて考察し、丸い背中を設計して実機を使って実験を行った。

## 3 丸い背中での動的起き上がり

### 3.1 丸い背中の利点

ロボットに丸い背中を装着することによって、床面との衝撃を抑えて  $E_{imp}$  が小さくすることができれば、より少ないエネルギーによって起き上がりを実現できると期待される。

ロボットに丸い背中をつける利点として以下の点があげられる。

- 上体が回転している時に床面との摩擦で失われるエネルギーが腰関節の一点で回転させるときよりも小さくなる。
- しゃがんで脚を曲げた状態のときに足先ができるだけ背中と一続きになるように設計すれば、回転中心の移動が滑らかに行われるので、足先と床面の衝突時の散逸エネルギーの量を減少させることができる。ただし、その場合に脚の各関節の可動範囲を考慮に入れなければならない。
- 非常に簡単な関節角軌道を関節角に与えるだけで起き上がることができる。

### 3.2 制御上の仮定

2.2 で述べた制御上の仮定に以下の点を加える。

- 運動の過程を以下の 3 つの状態に区分し、それらを経て立ち上がるものとする。

状態 A 脚を伸ばした状態で上方に持ち上げる。

状態 B 足裏が床面に接するまで、膝を曲げた状態で素早く脚を振り降ろし始める。このとき関節の角速度は最大になっている。

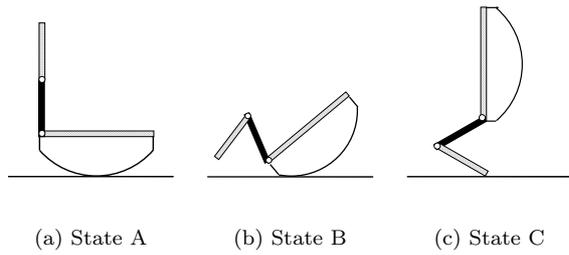


図 5: 丸い背中をつけた起き上がり運動の代表姿勢

状態 C 重心が足裏にうまく載ると、直立姿勢がとれるように膝を伸ばし起立する。

ロボットに丸い背中を装着したときのそれぞれの状態を図 5 に示す。状態 A から状態 B へと遷移する間に、ロボットの脚と胴体に運動エネルギーを蓄え、これを位置エネルギーに変換することによって、起き上がり運動が実現される。

本報告では図 6 のように、円弧状の背中をロボットに取り付けることとした。ここで、設定すべきパラメー

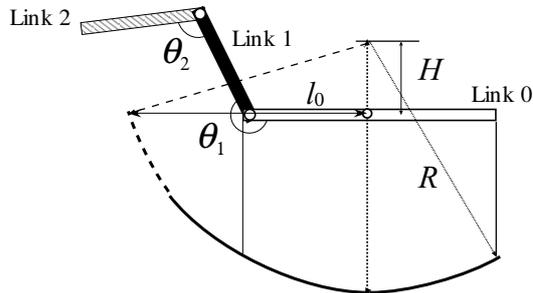


図 6: 丸い背中をつけたロボットのモデル

タは、ロボットの重心に対する円弧の中心の位置  $H$  と円弧の半径  $R$  である。また、脚を曲げた状態で足先ができるだけ背中と一続きになる、すなわち円周上に足先が来るように設定し、 $H$  と  $R$  は

$$R^2 = H^2 + l_0^2. \quad (4)$$

という関係を充たすようにした。

### 3.3 シミュレーションによるパラメータの検討

ロボットに取り付ける背中のパラメータ  $H$ ,  $R$  を、ダイナミックシミュレーションプログラムによって求めた。

表 2: ロボットのモデルのパラメータ

link	length [m]	weight [kg]	inertia [kg m <sup>2</sup> ]
body	0.20	3.55	$1.32 \times 10^{-2}$
thigh	0.10	0.7	$5.83 \times 10^{-4}$
shank	0.10	1.18	$9.83 \times 10^{-4}$
foot	0.098	0.50	$1.67 \times 10^{-5}$

joint	range[rad]
hip	1.92 ~ 5.15
knee	0.94 ~ 3.14
ankle	2.10 ~ 4.18

シミュレーションに用いるロボットのモデルのパラメータを表 2 に示す。重量バランスができるだけ HOAP-1 に近付くように設定した。

シミュレーションにおいては  $R = 0.2$ [m],  $H = 0.0$ [m] の背中によって起き上がりを実現できた。シミュレーション上において HOAP-1 の各関節に設計された軌道を追従させて、起き上がり運動を実現できた様子を図 7 に示す。

### 3.4 実ヒューマノイド HOAP での実装と実験

実験においては、富士通で開発された HOAP-1 を用いる。高さがおおよそ 0.48[m]、重量はおおよそ 6.0[kg] であり、片脚 6 自由度、片腕 4 自由度を備えている。装備されている腕はトルク不足で、腕を用いた静的な起き上がりを実現することができない。HOAP-1 の各関節はそれぞれローカルに位置制御されているので、予め設計された軌道に追従させることとした。

### 3.5 背中の実装と起き上がり

シミュレーションによって得られたデータを基に、丸い背中を設計し、ロボットに実装した。図 8 に実装した様子を示す。

HOAP-1 の各関節に設計された軌道を追従させると、起き上がり運動を実現することができた。この様子を図 9 に示す。

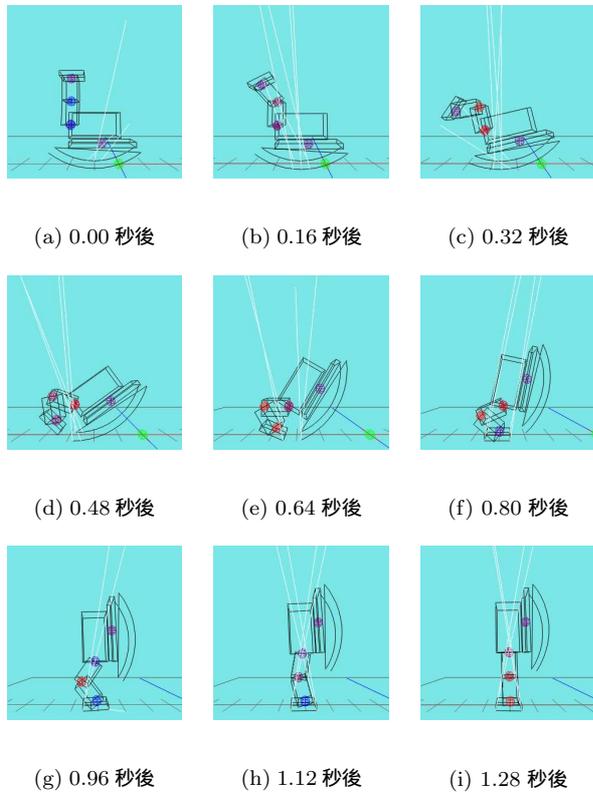


図 7: シミュレーション上での起き上がり運動

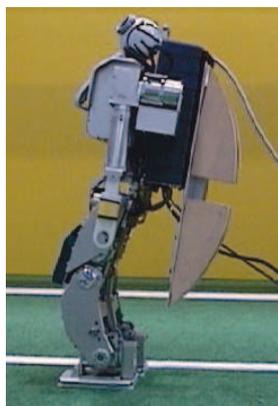


図 8: 丸い背中をつけた HOAP-1

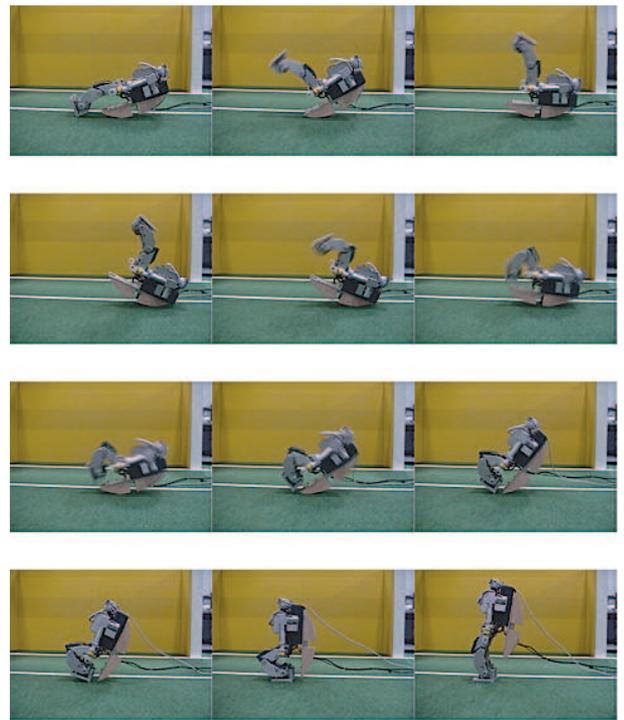


図 9: 起き上がり運動の様子

## 4 考察

起き上がり運動におけるポテンシャルエネルギーと運動エネルギーの変化を考察する．図 10 は初期状態におけるポテンシャルエネルギーを引いたロボット全体のポテンシャルエネルギーと，運動エネルギーを時系列で表したグラフに，特徴的なポテンシャルエネルギーの値を示した時刻におけるロボットの姿勢をあわせて表示している．ちょうど，ポテンシャルエネルギーが極値を示している時は運動エネルギーの方も極値になっているのがわかる．

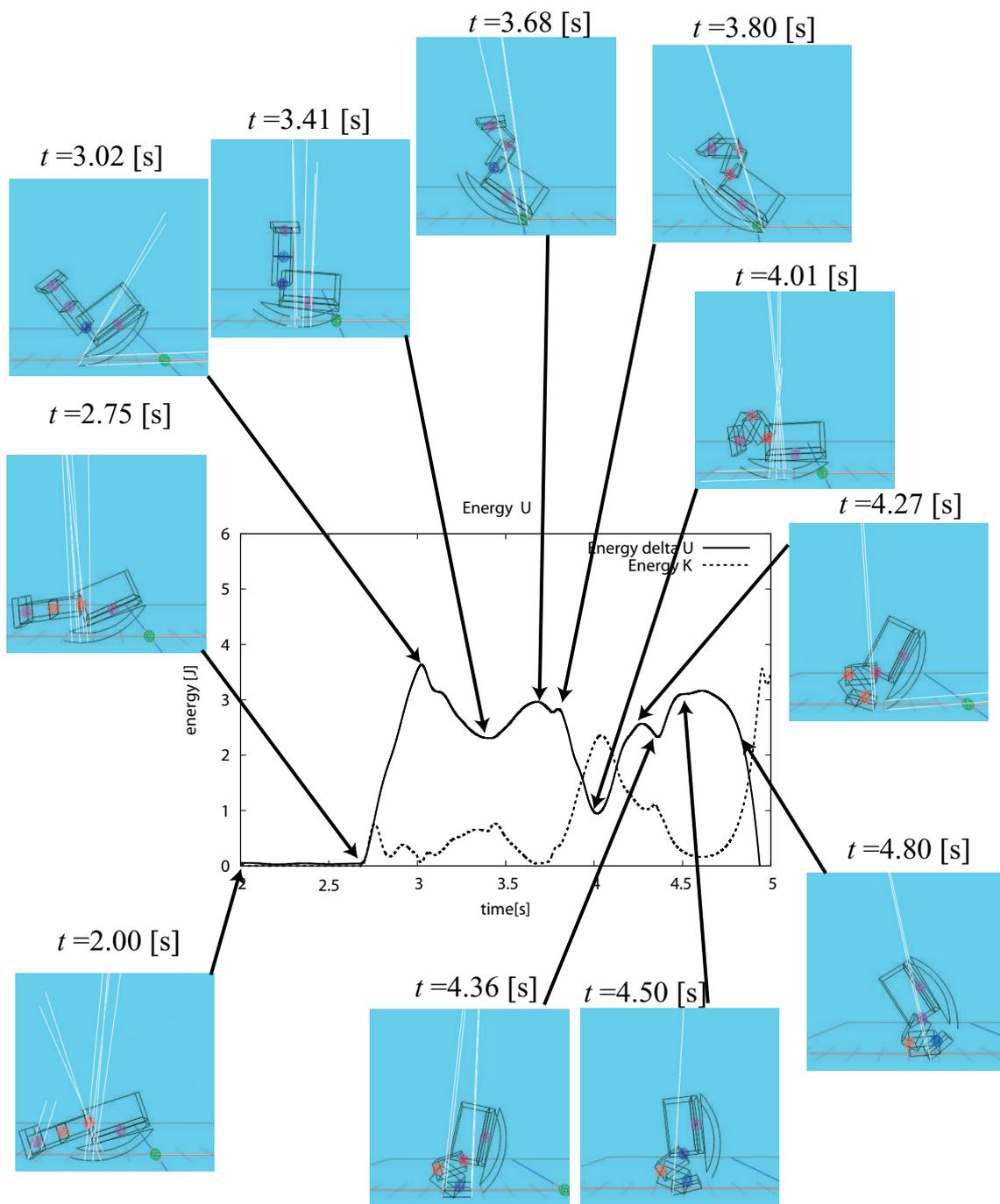


図 10: 起き上がり運動とエネルギー変化

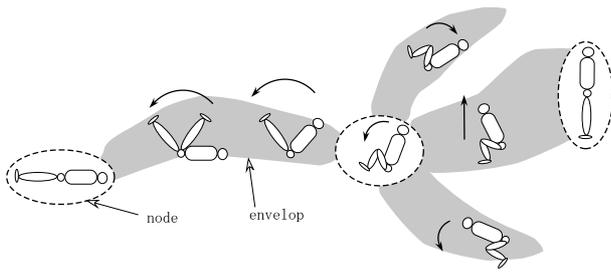


図 11: 起き上がり運動における大域力学系の概念図

Yamamoto, Kuniyoshi<sup>4)</sup> は起き上がり運動を大域力学系としてとらえることを提案している (図 11)。

ヒトの起き上がり運動にはいくつかのパターンがあり、その一連の行動には安定領域 (図 11 の灰色部分) と節点 (図 11 の点線で囲った丸) が存在し、安定領域中ではあらかじめ定められたパラメータによる運動なので制御のための計算コストが最小化されているとしている。本報告の起き上がり運動では図 5 での状態 A から状態 C までに相当する。また、節点は安定領域に挟まれた不安定領域であり、鞍点のような性質を持つ。すなわちほんの小さな摂動で状態遷移が起こり得るのである。図 5 における状態 C は節点に相当し、次の 3 つの領域への状態遷移を起こす可能性がある。

領域 1 状態 C に至る寸前で回転不足により、再び仰向けの姿勢になる。

領域 2 状態 C からバランスをとって直立する。

領域 3 勢い余って前方に倒れこむ。

図 10 では上記の領域 3 へ遷移した様子を示しており、 $t = 4.5 \sim [\text{sec}]$  からは徐々に倒れこんでいくため、ポテンシャルエネルギーが減少している。

以上のことから、所望の行動を得るためにはさまざまな安定領域を発見し、計算コストを削減する一方で、節点においては次の安定領域に遷移させるために制御をかければよいとすることができる。節点である状態 C から領域 2 への遷移を実現するためには、着地寸前に存在するポテンシャルエネルギーの鞍点 ( $t = 4.27[\text{sec}]$  付近) を越えて、前方に倒れ込まないように次の鞍点 ( $t = 4.50[\text{sec}]$  付近) を越えなければよいのである。そのために状態 C において何らかの制御を行う必要があり、今後どのような制御が有効であるか考えていきたい。

## 5 おわりに

本報告では、人間型ロボットの脚の振り降ろしを利用した動的な起き上がり運動について考察し、ロボットに丸い背中を設計、実装することで床面との衝突時におけるエネルギー損失を減少させ、実現させることに実験的に成功した。

今後はより安定して起き上がらせるために、考察でも述べたように着地時における制御を工夫したり、センサによるロボット自身の状態認知によって脚の振り上げ角の制御をオンラインで行うことにより、さまざまな床面で起き上がり運動が実現できるかどうかを考えていきたい。

## 参考文献

- [1] 金広文男, 稲葉雅幸, 井上博充. 倒れても起き上がることのできる人間型ロボット. 第 13 回日本ロボット学会学術講演会, Vol. 1, No. 1, pp. 195–196, 1995.
- [2] 森本淳, 銅谷賢治. 階層型強化学習を用いた 3 リンク 2 関節ロボットによる起立運動の獲得. 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 5, pp. 574–579, 2001.
- [3] 伊藤聡, 阪圭央, 川崎晴久. 脚の振り降ろしを利用した起き上がり運動について. 第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. CD-ROM 1I34, 2002.
- [4] Tomoyuki Yamamoto and Yasuo Kuniyoshi. Stability and controllability in a rising motion: a global dynamics approach. In *Proc. of the 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2467–2472, October 2002.

### 連絡先

〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1

大阪大学大学院工学研究科

知能機能創成工学専攻

大賀 淳一郎

E-mail: ooga@er.ams.eng.osaka-u.ac.jp

Tel: 06-6877-5111 内線 3381

FAX: 06-6879-7348

# DYNAMIC STAND UP MOTION OF A HUMANOID

Jun'ichiro OOGA\*, Masaki OGINO\*, Koh HOSODA\*<sup>†</sup> and Minoru ASADA\*<sup>†</sup>

*\*Dept. of Adaptive Machine Systems, <sup>†</sup>HANDAI Frontier Research Center  
Graduate School of Engineering, Osaka University*

Humanoid robots are expected to assist human dairy life. In order for robots to work flexibly in such environments, existing research has focused on stably walking with two legs without falling down. In a real world, however, even if a robot tumbles by accident, it should be able to stand up and walk again.

Kanehiro et al.(1995) developed the robot which could stand up statically using its both hands, but static stand up motion always needs static stability, and is less energy efficient than dynamic stand up motion.

On the other hands, Morimoto and Doya(2001) proposed a hierarchical reinforcement learning method which enabled a real robot to learn to stand up dynamically based on the subgoal sequence.

Ito et al.(2002) showed that a robot with a few DOFs achieved a stand up motion using leg swing movement. While these robots were fortunately well designed to have good properties such as the wide range of the joint angles, requirements for a robot with such properties to stand up has not been clear.

In this paper, we discuss the requirements of dynamic stand up motion. When the body of the robot rises up, the rotation center is located at hip joint, but after the collision between the foot of the robot and floor, it shifts to the sole. The shorter the distance of the rotation center between before and after collision is, the less the rotation energy loses by collision. In order to decrease the moving distance of the rotation center, we propose that (1) robot should have wide range of the joint angles, (2) the length of the shank is shorter than that of the thigh. We show a robot based on these requirements could stand up

in a computer simulation.

However, if the robot does not meet these requirements, it is very difficult to stand up dynamically. So, we propose that the back of these robot should be round by waist joint or attachment with curve.

The advantages of a round back are as follows; (1) the energy lost by friction during the rotation of the body decreases compared to without it, (2) if a round back is designed in such a way that the extended curve of the round back can reach the tip of foot, the energy lost by collision decreases because of the smooth shift of the rotation center, and (3) the objective trajectory of joint angles can be designed simply.

So, in order to find the proper parameters of a round back, we examine using a computer simulation and apply the result to a real humanoid robot, HOAP-1 produced by Fujitsu Automation Ltd. Since HOAP-1 does not have waist joint, we design a round back based on the result examined using a computer simulation, and experiment. We succeed in a dynamic stand up motion by HOAP-1 with the round back.