

学術論文

一脚ロボットの跳躍現象に関する研究

A Study on the Jumping Process of a One-Leg Robot

森 崇^{*1}(学生員), 中浜 昌文^{*1}, 井上 喜雄^{*2}, 芝田 京子^{*2}

Takashi MORI (Stu. Mem.), Masafumi NAKAHAMA, Yoshio INOUE, Kyoko SHIBATA

Recently, a few running robots have been developed. However, running speed is very low and stride of the robot is very short. In this study, the jump is designed as the basis process of running, and the jumping process of a one-leg robot is discussed, because the weight of a one-leg robot is light and the jump of a one-leg robot is simpler than those of two-legged running robots. In the first, this study examines various conditions for realizing large jumps of the one-leg robot. The one-leg robot with two actuators in the knee and the ankle joint is designed. Secondly numerical simulation for calculating jumping process of a one-leg robot is carried out by using multi-body dynamic analysis and Simulink tool box in Matlab. According to the analysis of results, we have found that the initial inclination angle of the one-leg robot's jumping process and the length of the foot are two important parameters to maximize the jumping distance of the one-leg robot.

Keywords: one-leg robot, linkage, jump, numerical simulation, multi-body dynamics

1 緒言

近年, 人間型ロボットなど, 脚移動ロボットに関する研究が進み, ロボットの走行事例[1-3]もいくつか発表されている。ここで, 走行したと言われているのは, 両足が地面と接触していない期間が存在することであるが, 現状では, 人間の走行と比べれば, その期間は短く, 走行速度も非常に遅い。人間に近い高速の走行を実現するには, ストライドを大きくすること, すなわち, より長い距離を跳躍する必要がある。

走行時の跳躍は, 立脚相の状態にある側の脚と地面との間の相互作用により行われるが, 人間型ロボットのその脚は, 上肢やもう一方の脚の重量も支えなければならない。一方, 下肢のみの一脚ロボットであれば, 自身の重量のみを支えればよいので, 跳躍をさせるという点では有利であり, また, 構造が単純で現象を理解しやすい。二脚での走行と一脚での跳躍では本質的に異なる部分もあるが, より単純な一脚ロボットで得られた知見は, 二脚の現象を考える上でも有用であると考え, 本研究では, 一脚ロボットを用いてその跳躍現象について検討する。一脚ロボットについては, 美多ら[4]による静止状態・ホッピング走行に関する研究

や三平ら[5]による Acrobot による跳躍系の制御の研究が行われている。本研究では市販モータなど汎用の部品を用いた軽量の一脚ロボットを考え, その制御方法や足の形状が跳躍に対して, どのような影響を及ぼすかについて検討する。ここでは, その第一歩として, 剛体マルチボディダイナミクスを用いた数値シミュレーションにより検討を行う。

2 一脚ロボットの概要および制御方法

人間の走行において, 両足が地面と接触していない状態へ移行する場合には, それまでの走行方向の速度による運動エネルギーと立脚相の側の脚が地面と接触している部分を反力壁として, 関節にトルクを作用させることにより創生する跳躍方向への運動エネルギーにより跳躍ができていると考えられる。二脚ロボットにおいて, 片脚が遊脚期の場合には, 両脚が地面から離れている状態を除き, もう一脚が立脚期に入って自重を支えており, 遊脚側は, 振り子のような挙動をするが, 一脚の場合には, そのような作用はない。したがって, 跳躍後の挙動は, 一脚と二脚では大きく異なるが, 跳躍までの過程には, 共通の部分があると考えられる。

ここでは, 主に一脚ロボットの跳躍のみに着目し, その第一歩として, 定常的な走行に見られる跳躍するまでの走行方向の運動エネルギーの影響についてはあまり考慮せず, 静止状態からスタートする場合について検討する。

連絡先: 森 崇, 〒782-8502 高知県香美市土佐山田町
宮ノ口 185, 高知工科大学大学院工学研究科基盤工学専攻
知能機械システム工学コース,
e-mail: 095235z@gs.kochi-tech.ac.jp

^{*1} 高知工科大学大学院 ^{*2} 高知工科大学

Fig.1 に、検討の対象とする一脚ロボットの概要を示す。これは一脚ロボットの側面から見たものである。リンク機構で、腿部分の上端には質量が固定されているとした。これは制御用コンピュータやバッテリー、モータドライバをこの部分に積載することを想定したからである。また足首関節と膝関節には市販のモータと減速器を取り付け、これにより跳躍するものとした。

今回検討した跳躍としては、直立姿勢から、膝と足首関節を曲げて質量部分を移動させることによりロボットを前傾させ、踵が浮いた状態で膝と足首を伸ばして質量部分を前斜め上に加速するように制御を行う。

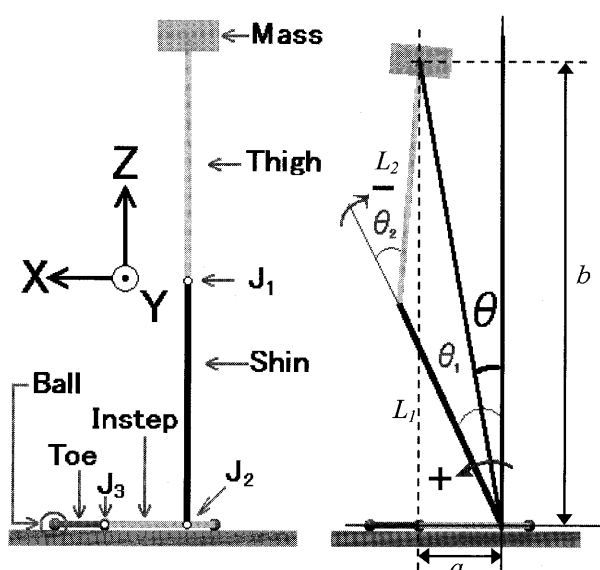


Fig. 1 Mathematical model of one-leg robot 1

Fig. 2 Definition of θ

3 解析手法および解析モデル

直交座標系(X, Y, Z)において X-Y 平面を地面とし、モデルの前進を X 方向の正に、モデルの上昇を Z 方向の正として Z 方向の負に重力加速度が作用する空間でリンク機構の一脚ロボットのモデルを作り、2 次元問題としてシミュレーションを行い、跳躍を検討する。シミュレーションの環境として、MSC.visualNastran 4D 2003 (以下 vN4D) と MATLAB6.5 の Simulink5.0 を使用した。vN4D は、剛体マルチボディシステムの動力学を用いた解析と Nastran の構造解析の一部を合わせたソフトである。なお、地面との拘束は自由であるが、地面との接触時にモデルに発生する力は摩擦係数と反発係数にて定めている。

一脚ロボットの解析モデルは前述した Fig.1 と同様にし、モデルの寸法とパラメータを Table 1 に記す。

なお、リンク先端に質量が固定されたモデルと考えているが、各リンクは均一の部材で質量を持つとし、リンク全体と質量部分の質量はほぼ同じとした。膝関節 (J_1) と足首関節 (J_2) にはトルクを発生させるものがあるとして、その最大トルクは市販のモータと減速機の効率を考慮して 15 Nm とした。

vN4D モデルへの入力として膝関節と足首関節にそれぞれトルクを与え、モデルから出力されるものを足首関節と膝関節の角度、膝関節の角速度とした。

制御アルゴリズムは Simulink において、C 言語でプログラミングし、各関節に与えるトルクは膝関節と足首関節の角度を基に決定した。足首関節はトルク制御、膝関節は、角速度をフィードバックする形での速度制御を用いた。足首関節をトルク制御とした理由は跳躍に必要なトルクがどの程度か調べるためである。膝関節を速度制御とした理由は、膝関節の角度がモデルの姿勢に大きな影響を与えるため、今回の跳躍には速度制御が適していると考えたからである。

計算は直立姿勢から膝と足首関節にトルクを与えて脚を曲げ、質量部分を移動しモデルを前傾させ踵が浮いた姿勢で脚を伸ばし、爪先で踏み切る跳躍を行った。

4 計算結果

4.1 跳躍姿勢による影響

跳躍姿勢の影響として、質量部分の位置が考えられる。仮に足首関節を原点として回転すると考えると、質量部分は 2 リンク機構の手先の位置として考えられ、手先の回転角度と、その半径が 2 リンク機構の姿勢に関わってくる。このモデルにもこのことは適用可能で、ここでは直立状態から回転した角度を θ とし、この角度 θ を規準として足首関節に跳躍させるためのトルクを与えた。角度 θ は順運動学より、次の(1)~(3)式で求められる。Fig. 2 に一脚モデルにおける角度 θ を示す。

$$a = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (1)$$

$$b = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{a}{b}\right) \quad (3)$$

また足首関節を中心とした場合の手先位置の半径が長い場合と短い場合、つまりは Fig.3 のように脚を曲げて伸ばすという駆動長さを変化させた場合に跳躍に及ぼす影響を調べるためシミュレーションを行った。

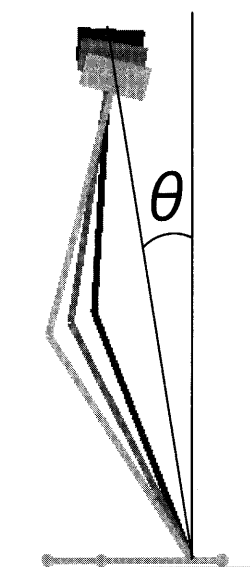


Fig. 3 Affect of a drive length

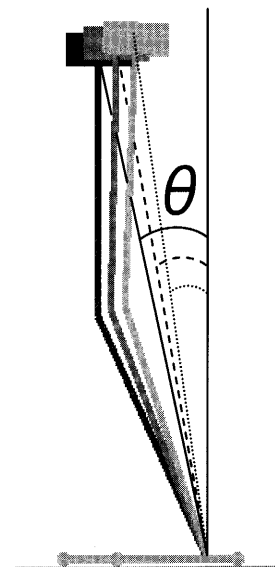


Fig. 5 Affect of an angle

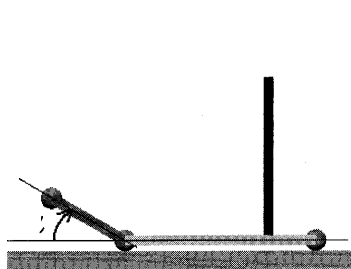
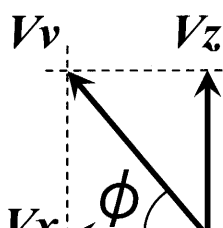
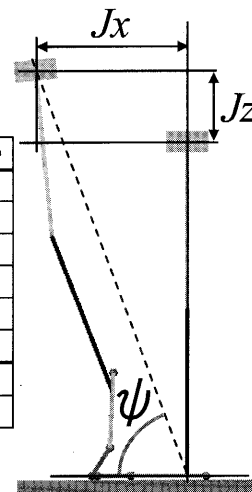
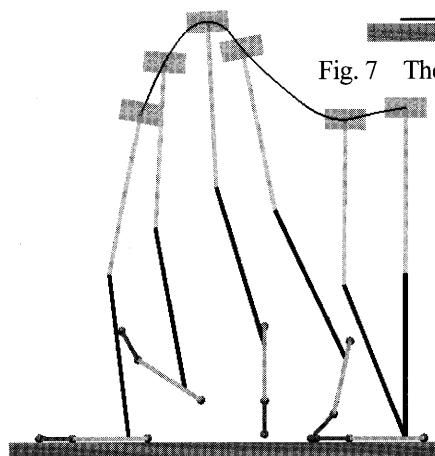
Fig. 4 The angle α 

Fig. 6 The vector of velocity

足の形状はFig.1のように足指関節 (J_3) を設けて4リンク機構とし、地面との接触は6個の球体による点接触とした。Fig.4に示すように足指関節は $0 \sim 30 \text{deg}$ の範囲 $\alpha(\text{deg})$ で動作するものとし、関節は回転のバネ・ダンパにより動作するものとした。このことについて、踵が早めに上がる状態を実現するためには足の長さは短いほうが良いが、足首の回転を直線運動に変換する場合に半径が長いほうが単位角度あたりの直線運動の移動距離が大きいことと関係しているが、詳細については後述する。

Table 1 Sizes and Parameters

Parts	Weight(kg)	Size [x y z] (m)
Mass	4	0.1 0.1 0.05
Thigh	1.5	0.01 0.05 0.4
Shin	1.5	0.01 0.05 0.04
Instep	0.7	0.18 0.05 0.01
Toe	0.3	0.08 0.05 0.01
Ball	0.01×6	Radius 0.01
Coefficient of friction		0.4
Coefficient of restitution		0.1

Fig. 7 The length J_x and J_z Fig. 8 Jumping motion 1 ($\theta = 9 \text{deg}$)

4.1.1 角度による影響

Fig.5に示すように角度 θ を $7 \sim 11 \text{deg}$ まで変化させた場合の跳躍の変化を検討する。 θ が大きいほど質量部分が前進方向に移動するので、水平方向の跳躍距離が長くなると推測される。なお、制御の目標値として足首関節の前傾時のトルクを S_t 、膝関節の前傾時の角速度の目標値を V_1 、跳躍までの膝関節の角速度の目標値を V_2 とし、それぞれ S_t , V_1 , V_2 は 4Nm , -40deg/s , 20deg/s の値でシミュレーションを行った。これは跳躍に適するように試行錯誤的に導き出した値であり、これらの目標値の跳躍距離に及ぼす影響に関しては次節に記述する。

Table 2 Jumping distance and velocity (Affect of an angle)

$\theta(\text{deg})$	X(m)	Z(m)	Jump	Vx(m/s)	Vz(m/s)	$\phi(\text{deg})$	Vv(m/s)	Jx(m)	Jz(m)	$\psi(\text{deg})$
7	0.660	0.204	○	0.312	1.050	73.45	1.10	0.274	0.172	74.26
8	0.667	0.190	○	0.534	1.020	62.37	1.15	0.339	0.167	70.68
9	0.668	0.181	○	0.737	0.972	52.83	1.22	0.411	0.164	66.91
10	0.654	0.178	○	0.966	0.909	43.26	1.33	0.477	0.146	63.24
11	---	0.173	×	1.190	0.831	34.93	1.45	0.539	0.129	59.88

角度 θ における跳躍距離の値の水平方向を X 、垂直方向を Z で表し、跳躍開始までの質量部分の垂直方向の最高速度を V_z とし、その時の水平方向は V_x とした。また、Fig.6 に示すように V_x と V_z を合わせた速度ベクトルを V_v とし、そのベクトルと V_x のなす角度を ϕ とする。また Fig.7 に示すように開始時から V_z の時の質量の位置を J_x (水平方向)と J_z (垂直方向)とし、開始時の足首関節の位置を原点として、そこから質量の位置の角度を ψ とした。これらをまとめたものを Table 2 に記す。

Fig.8は9degのときのシミュレーション結果である。直立状態から前傾して、角度 θ に達すると足首関節に関節を伸ばすトルクが与えられ、足指関節を中心に回転し、まず踵が上がり、足指関節が制限角度 α まで曲がりきったところで回転支点が爪先に移動し、爪先立ちとなり、足首関節を伸ばし続けると跳躍した。

Table 2 より θ が 7~10 deg では跳躍に成功したが、11 deg では跳躍状態後に爪先が地面と接触し転倒した。 θ と跳躍距離 X に注目すると、推測した通り θ が大きいほど跳躍距離が長くなっている。また θ が 7~11 deg と大きくなるにつれて ϕ が小さくなっている。この ϕ は 45deg より小さくなると跳躍距離が短くなった。これにより跳躍が ϕ を投射角、 V_v を初速とした斜方投射の運動と類似しているのではないかと考えられる。

そして跳躍距離を最大にする最適値があるという結果を得られた。

4.1.2 駆動長さによる影響

この節では、前節で変化させていた θ の値を固定し、目標値の足首関節の前傾時のトルク S_t 、膝関節の前傾時の角速度 V_1 、跳躍までの膝関節の角速度 V_2 をいくつかの条件で変化させた場合、つまりは、Fig.3 に示したように膝の曲げ伸ばしの駆動長さが跳躍にどのような影響を及ぼすのか、シミュレーションを行った。

なお、前節で変化させていた角度 θ を、跳躍距離、角度 ϕ 等から今回は 9deg で固定とした。

条件ごとに各目標値を変化させて、結果を比較することにより跳躍距離に及ぼす影響を調べる。その条件は Table 3 に結果と同記した。前傾時のトルク S_t が 4Nm から 3Nm としている場合は角度 θ に達するまでの時間が遅く、膝を深く曲げると予想され、膝関節の前傾時の角速度 V_1 を -40deg/s から -60、-80deg/s と大きくした場合も角度 θ に達するまで深く膝を曲げると考えられる。膝関節の跳躍までの角速度 V_2 を 20deg/s から 40deg/s と大きくした場合は膝を伸ばすのが速くなると考えられ、跳躍距離が大きくなると推測される。

Table 3 に示すように跳躍の項目に注目すると Condition 8 以外は跳躍可能であった。Condition 8 の J_z の値をみると結果 1 の跳躍不可の場合の値 0.129m を下回っている。そして Condition 8 の ϕ についても 40.74deg と 45deg を下回っている。Condition 8 以外はすべて ϕ が 45deg 以上で、 J_z も跳躍不可の場合の値を上回っている。加えて V_z 時の質量部分の位置までの角度を示す ϕ も一番低い値、つまりは前傾し過ぎたことを示しており、跳躍に適していないことがわかる。これにより、跳躍も初速と投射角度、そして高さによって到達距離に影響があるため、斜方投射の運動に類似しているという裏づけを得た。また予想していた駆動長さにおける影響は多少あったものの、前節の角度 θ ほどの顕著な影響は見られなかった。これは質量部分の駆動方向があまり変化しなかったためか、もしくは S_t 、 V_1 、 V_2 の値を変化させる割合が少なかったことが考えられる。

4.2 足の形状による影響

今回の跳躍方法は踵が浮いた状態で、足関節と膝関節の回転を跳躍方向の並進方向の運動に変換している。

Table 3 Jumping distance and Velocity (Affect of a drive length)

	S_t	V_1	V_2	$X(m)$	$Z(m)$	Jump	$V_x(m/s)$	$V_z(m/s)$	$\phi(deg)$	$V_v(m/s)$	$J_x(m)$	$J_z(m)$	$\psi(deg)$
Condition 1	4	-40	20	0.668	0.181	○	0.737	0.972	52.83	1.22	0.411	0.164	66.91
Condition 2	4	-60	20	0.679	0.183	○	0.842	0.942	48.21	1.26	0.374	0.174	68.99
Condition 3	4	-60	40	0.667	0.182	○	0.850	0.969	48.74	1.29	0.439	0.156	65.34
Condition 4	4	-80	20	0.667	0.182	○	0.913	0.910	44.91	1.29	0.447	0.123	64.16
Condition 5	3	-40	20	0.680	0.183	○	0.648	0.989	56.77	1.18	0.391	0.167	67.98
Condition 6	3	-60	20	0.686	0.185	○	0.810	0.945	49.40	1.24	0.427	0.142	65.62
Condition 7	3	-60	40	0.678	0.184	○	0.821	0.978	49.99	1.28	0.434	0.154	65.54
Condition 8	3	-80	20	---	0.179	×	1.010	0.870	40.74	1.33	0.470	0.101	62.45

Table 4 Jumping distance to change angle α

α (deg)	X(m)	Z(m)	Jump
0 - 0	—	—	×
0 - 10	—	0.176	×
0 - 30	0.668	0.181	○
0 - 50	0.676	0.191	○
0 - 70	0.642	0.205	○
0 - 90	0.584	0.190	○
0 - 360	0.506	0.157	○

そのため、足の甲と爪先部分を足し合せた長さ（以下：足の長さとする）の影響は、足が浮くタイミングや回転から並進への変換に大きく影響すると考えられるので、その影響について検討する。

4.2.1 関節型

足の長さが長い場合と短い場合を足指関節の制限角度範囲 α を変化させることによって検討した。 α が 0-0deg の場合は足指関節を完全に固定して爪先で回転、つまりは足の長さが最も長いときであり、値が 0-360deg の場合は自由に回転して足指関節で回転、つまり足の長さが最も短いときである。

各 α での跳躍距離をまとめたものを Table 4 に記す。 α が 0-0deg の場合は先程の Condition 1 で用いた制御則では、踵すら上がらず、そのまま転倒する結果となった。一方 0-360deg の場合にも同じ Condition 1 の制御則にてシミュレーションを行ったところ、X 方向への跳躍距離は制限を設けた場合 (α が 0-30deg) より小さくなった。

従って、モデルの足の長さは短いほうが踵を浮かせやすいが駆動長さが確保しにくく、X 方向へ跳躍距離は少ない。故に跳躍距離を伸ばすには脚の長さが長いほうが良いと考えられる。そこで足部分に関節を設けることにより、跳躍開始までに足指関節、爪先の順番に回転支点を移動させることができるため水平方向の跳躍を向上させることに適していると考えられる。

足の長さが長い場合に踵が上がりにくい理由としては今回のモデルは質量部分が他の部位より重い場合、足の長さが長いほど、モデルを傾斜させた場合に重力によって質量部分がモデル全体を爪先の回転支点付近とは異なる場所を中心に回転させようとすると考えられる。これにより爪先にかかる垂直抗力が減少し、地面との接触が弱まり、爪先での回転させにくくなると考えられる。また垂直抗力が減少することで大きな推

進力の場合には滑る可能性もある。

これまでのシミュレーションからもわかるように一脚ロボットの跳躍までの運動、つまり踵が浮いた状態後の運動は自由度に対して十分な数の駆動系を持たない劣駆動系と考えられる。そして、モデルを前傾させ膝関節と足首関節を伸ばすようなトルクを与えることにより爪先を支点としてモデル全体で回転を行い、重力加速度以上の加速度で質量部分を加速させて前方へ跳躍を行っていると考えられる。

モデルを前傾させるには膝と足首関節を曲げる方向に回転させる必要があるが、このときのモデルの回転中心は踵付近にあり、モデルを前傾させることによって足首を曲げて伸ばす駆動長さを確保する効果と爪先で回転させやすいように重心を前に持ってくる効果がある。そしてある程度、重心が前に移動したときに足首関節を伸ばす方向にトルクをかけることによって爪先中心で回転することができ、それにより、踵が浮いた状態となり、踵が上がることによって脚が伸びる方向が前斜め上になり、斜方投射に類似できる運動になったと考えられる。

4.2.2 曲面型

足指関節により支点が2段階で変化するモデルのかわりに連続的に支点が変化する足底を曲面型にした場合にどのような跳躍現象になるか検討する。

足の形を Fig.9 のように足底を曲面にし、腿、脛、質量部分は関節型と同じモデルを使用した。Fig.10 に足の寸法を示し、その曲率は試行錯誤的に決定した。膝と足首関節を持った3リンク機構とし、足の重量は関節型で爪先、足の甲、地面と接触していた球体の質量を足し合せた重量と同じにした。また、足首関節を取り付ける位置も関節型と同じ様にした。制御則は関節型と同じように膝と足首を曲げ、ある角度 θ に達すると、関節を伸ばし跳躍させる。なおここでは跳躍させることだけを目的としている。

Fig.11 に示すように足底を曲面としたことにより、直立状態から踵が下がり、爪先が上がった状態で姿勢を保ちつつ、膝と足首関節を曲げて跳躍する関節型と同様な結果となった。しかし、関節型との大きな違いは、関節型の場合には、着地時における足首関節に発生する拘束トルクが大きかったが、曲面型はこれと比較すると、大幅に軽減されていた。着地の挙動をみると踵から地面と接地すると足が足底に沿って地面を転がり、モデルが前後に振動する運動が生じた。この振

動は前後に揺れながら地面との摩擦などの減衰によってやがて止まると思われるが、この運動を次の跳躍に生かせないかと考え、連続跳躍が可能か検討した。

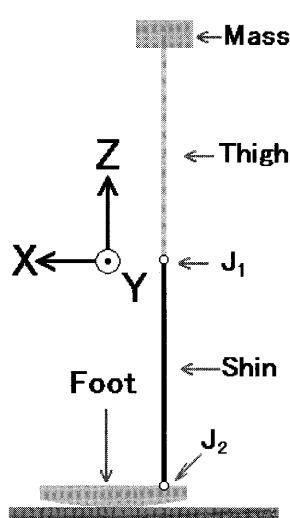


Fig. 9 Mathematical Model of One-Leg Robot 2

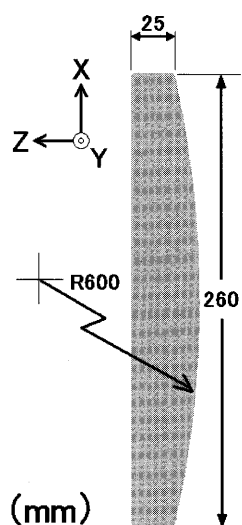


Fig. 10 The shape of Foot

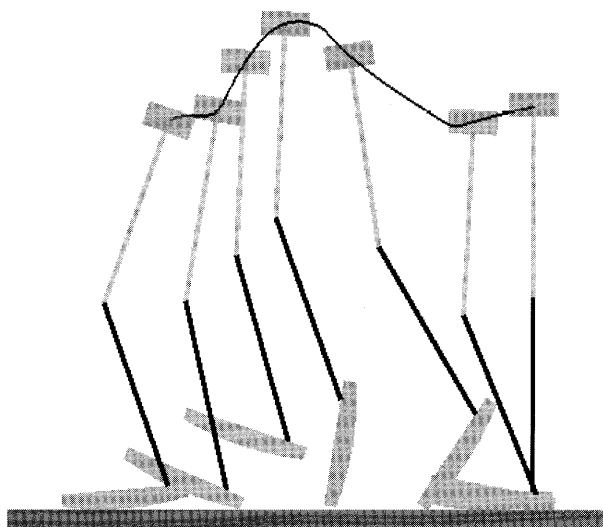


Fig. 11 Jumping motion 2 (a curved surface foot)

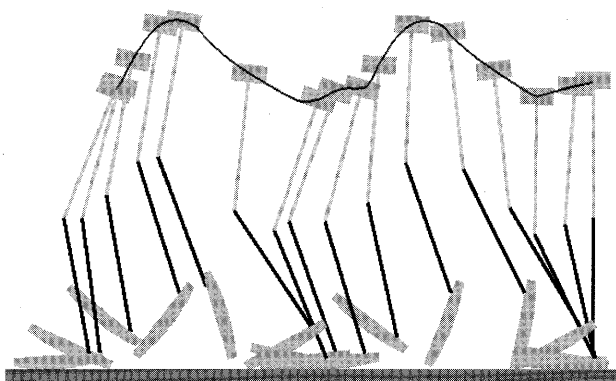


Fig. 12 Jumping motion 3 (A continuous jump)

4.3 連続跳躍

これまでは、走行において両足が地面と接触していない状態へ移行する場合に、静止状態からの1回の跳躍について検討を行ってきたが、4.2.2で示した曲面型の例について、1回目と同様の制御アルゴリズムを用いて2回連続的な跳躍が可能かどうかの検討を行った。

Fig.12 に計算結果を示すが、2回目についても跳躍が行われていることを確認できた。

5 結言

一脚ロボットは、立脚期に支える自重が、人間型ロボットなどと比較して軽く跳躍しやすいことに着目し、一脚ロボットの跳躍現象について数値シミュレーションにより検討した結果、以下の結論を得た。

1) 初期状態から構造全体を徐々に前傾させ、踵がある程度浮いた状態で、足関節、膝関節を伸ばし前方へ跳躍するという制御方法を採用した結果、市販の部品により構成されるモデルで、十分跳躍が可能であること、跳躍距離を最大にする跳躍開始時の傾斜角度が存在することを確認した。また、現象としては、斜方投射と類似したものであることがわかった。

2) 足の長さが長すぎると、踵が上がるまでに前傾が深くなりすぎて、転倒してしまう。足の長さが短すぎると十分な跳躍高さが得られないという結果が得られ、足指関節を設け、踵が上がるまでは、短い足と同等で跳躍の最終段階では、長い足と同等の効果を持たせることができ、結果として長い跳躍距離が得られた。さらに、足首関節のように途中で支点を移動させる機構がなくても、連続的に支点に変化する足底が曲面のものについても検討した結果、足指関節を用いた場合と同様の結果が得られた。

今後は、初速の影響の検討や、一脚ロボットの製作を行う予定である。

(2005年4月28日受付, 2005年12月16日再受付)

参考文献

- [1] HONDA, 「ASIMO」 <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>
- [2] SONY, 「QRIO」 <http://www.sony.co.jp/SonyInfo/QRIO/>
- [3] 産業技術総合研究所, 「HRP-2LR」
http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2004/pr20040415_2/pr20040415_2.html
- [4] 美多勉, 池田貴幸, 篠原隆之, 可変拘束制御を用いた三次元脚式ロボットの走行制御, 日本ロボット学会誌 Vol. 21 No. 1, pp.94~102, 2003.
- [5] 三平満司, 高橋晶子, 宮崎正博, Acrobot 型劣駆動跳躍系の制御, 日本機械学会[No.00-2]ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集, 2P2-84-120.