240 2 関節跳躍ロボットの開発と運動制御 Development and Motion Control of Two Joint Jump Robot

○ 柚木 昂 (群馬大院) 正 村上 岩範 (群馬大)
谷澤 翔 (群馬大院)

Takashi YUNOKI, Gunma University
Iwanori MURAKAMI, Gunma University, Tenjincho1, kiryu-shi, gunma
Sho YAZAWA, Gunma University

In this research, the jump robot of three links structured with two actuators was developed. The overall height of this jump robot is circa 660mm. A jump experiment and a landing experiment were conducted. As a result of these experiments, it was confirmed the motion control of the jump by the trajectory tracking control was possible and the landing control using the damping force was useful. A continuous jump experiment was done from these results. It was confirmed the continuous jump movement using landing control was possible. And, the numerical analysis of the robot that grounded and jumped was done.

Key Words : jump robot, trajectory tracking control

A1. はじめに

近年、ロボットの活動範囲は広がっており、我々の身近でも様々な形態のロボットが開発されているが、人間の脚の機構を再現しながらも、ロボットに人間同様の高速な動作を行わせる事に成功した例は少ない。本研究では人間の脚と同程度の大きさで、高速運動が可能な劣駆動跳躍ロボットを開発した。また、フィードバック制御を用いた目標軌道追従による跳躍実験及び、ロボットの運動の解析、着地時における減衰力を用いた着地制御を行い、本研究で提案した跳躍ロボットの有用性を検証した。

A2. 実験結果

A2・1 最大跳躍実験結果 実験により得た最大跳躍の検出角度と目標角度を Fig.A1 に、数値解析により得た重心の軌道を Fig.A2 に、接地部の軌道を Fig.A3 に、跳躍の連続写真を Fig.A4 に示す。Fig.A1 に示すように目標角度と検出角度はほぼ一致しており、フィードバック制御による関節角度の高速な軌道制御が可能であるといえる。跳躍最大高さは 220[mm]であり、跳躍高さ・全長比は 0.326 と高い値が得られた。解析値は 290[mm]と実験値より高い値が得られたが、数値解析では配線や各部における損失などを考慮していないためと考えられる。また、着地時の接地部の傾きは実験では地面にほぼ水平、解析では接地部前部の高さが 37[mm]と結果が異なるが、実験では配線を引き上げながら跳躍を行っているため、後方向への回転が弱まった影響と考えられる。

A2・2 着地実験結果 前方跳躍及び後方跳躍における着地実験を行い、制御時と無制御時の着地姿勢を映像から検証すると、無制御時では着地後に跳ね返り現象が確認されるが、制御時では各関節で衝撃が吸収されており、減衰力を用いた着地制御の有用性を確認した。

A2・3 連続跳躍実験結果 前方・後方連続跳躍においても連続した各々の跳躍において跳躍高さ・跳躍移動距離に再現性があり、減衰力を用いた着地制御を行うことで連続跳躍運動を成功した。1 回目の着地から 2 回目の跳躍の瞬間までの間隔は前方では約 0.8[s]、後方では約 0.44[s]という結果が得られた。

Fig.A1 Change in angle of joint

Fig.A2 Trajectory of gravity point

Fig.A3 Trajectory of landing part

Fig.A4 Motion of maximum jumping

1. 緒言

近年、ロボットの活動範囲は広がっており、我々の身近でも様々な形態のロボットが開発されているが、人間の脚の機構を再現しながらも、ロボットに人間同様の高速な動作を行わせることには未だ成功していない⁽¹⁾⁽⁸⁾。本研究では人の脚と同程度の大きさで、高速運動が可能な2関節劣駆動跳躍ロボットを開発した。これを用いてフィードバック制御を用いた目標軌道追従による前方跳躍、後方跳躍、および着地姿勢制御を行った。また、接地状態及び、それに続く跳躍運動中の空中姿勢制御時の数値解析を行い、この結果を基に再度跳躍実験を行うことで、その有用性の確認を行うこととした。また着地シーケンスにおける速度成分のフィードバックゲインを増大させることによって、各関節でダンピング力を発生させて着地時の衝撃を軽減できるかを映像及び、着地後のロボットの姿勢、さらにロボットの転倒の有無により判断する。さらに、この着地制御を用いて跳躍ロボットに連続跳躍運動を行わせることを目標とした。

2. 実験装置

2・1 2関節跳躍ロボットの構造

本研究で製作した跳躍ロボットの写真と分解図を Fig.2.1 に、諸元を Table 2.1 に示す。Fig.2.1 (b)に示すように本跳躍ロボットは主に脚上段(Fig.2.1 (b) ①)、脚中段(Fig.2.1 (b) ②)、接地部(Fig.2.1 (b) ③)の3つの部分から構成される。本跳躍ロボットの特徴として、ギアボックスを使用することで関節部に機構を集中させた構造となっているため、ロボット全体としての構造が簡素であること、モータを主動力としているため連続的な動作が可能という点が挙げられる。

また、本跳躍ロボットの膝関節には Fig.2.2 に示すような単関節機構を採用しており、これにより Fig.2.3 に示すように運動制御に必要な可動範囲を得る構造となっている。

また、本跳躍ロボットは引張ばねによって各リンクに自重補償トルクを発生させている。概念図を Fig.2.4 に、諸元を Table 2.2 に示す。Fig.2.4 に示すように引張ばねはワイヤーで脚上段と脚中段、脚中段と接地部の間にプーリーを介して接続されている。引張ばねがワイヤーを引くことでプーリーを介して相対運動を行い、脚中段が脚上段を、接地部が脚中段を起き上げる運動を行う。この機構により自重補償を行う推力を発生させる。

2・2 ギアボックスの構造

本跳躍ロボットでは、各関節部にモーター一体型で減速歯車機構、角度検出機構を内蔵したギアボックスを使用している。ギアボックスの写真とその内部の写真を Fig.2.5 に、モータの諸元を Table 2.3 に示す。本ギアボックスでは Fig.2.5 (b)に示すように平歯車及びウォームギアによる減速歯車機構、角度検出機構を内蔵しているため、関節の回転運動を行うための動力伝達、運動制御に必要な関節角度の検出を行うことが可能な構造となっている。本ギアボックスでの減速比はモータから平歯車に動力伝達する際のギア比を変えることで Type-A、Type-B の2種類を用意した。ギアボックスの諸元を Table 2.4 に示す。本跳躍ロボットでは脚上段のギアボックスに Type-A を、脚中段のギアボックスに Type-B を用いた。

角度検出にはポテンショメータを使用しており、同一比の歯車によりウォームホイールの回転軸の回転角度を間接的に検出することで関節の角度を検出する構造となっている。また、各回転軸の軸受にはラジアル玉軸受、ウォームギア動作時によって発生するスラスト荷重についてはスラスト玉軸受を使用して、動力伝達時の損失を低減している。

Fig.2.1 General view of jump robot

Fig.2.2 Behavior of joint part

Fig.2.3 Photo of joint part

Fig.2.4 Geometry of empty weight compensation

Fig.2.5 Photo of gearbox

2・3 軽量複合材

本跳躍ロボットの構造材には軽量複合材を使用している。軽量複合材は Fig.2.6 に示すようにコブナ樹脂混合材を厚さ 0.3mm のジュラルミン板で挟み、電気炉内で加圧しながら加熱して熱再硬化させたものである。コブナ樹脂混合材は SK レジン、黒鉛、3mm 炭素繊維を 17:2:5 で混合したものである。本軽量複合材は非常に軽量で高弾性・高強度であり、炭素繊維が含まれているため自己潤滑性があるという特徴がある。軽量複合材の諸元を Table 2.5 に示す。

3. 運動の解析

実験を行う前に運動方程式を用いて数値解析を行った。数値解析では跳躍前の接地状態と、跳躍後から着地までの浮遊状態において検証を行った。

3・1 3 リンク劣駆動ロボットの運動方程式の導出

Fig.3.1 に示すようなモデルをもとにニュートンオイラー法を用いて初期条件を変えることで接地状態及び浮遊状態を表す運動方程式を以下に示す。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_0 + \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{\phi}_2 \\ \ddot{\phi}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix}$$

ただし、

$$\begin{aligned} A_{11} &= m_2 \left(L_1^2 + 2L_1L_{g2}C_2 \right) \\ &\quad + m_3 \left(L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2C_2 + 2L_2L_{g3}C_3 + 2L_1L_{g3}C_{23} \right) \\ &\quad + I_1 + I_2 + I_3 \\ A_{12} &= m_2L_1L_{g2}C_2 \\ &\quad + m_3 \left(L_2^2 + L_1L_2C_2 + L_1L_{g3}C_{23} + 2L_2L_{g3}C_3 \right) + I_2 + I_3 \\ A_{13} &= m_3 \left(L_1L_{g3}C_{23} + L_2L_{g3}C_3 \right) + I_3 \\ A_{21} &= m_2L_1L_{g2}C_2 \\ &\quad + m_3 \left(L_1L_2C_2 + L_1L_{g3}C_{23} + L_2^2 + 2L_2L_{g3}C_3 \right) + I_2 + I_3 \\ A_{22} &= m_3 \left(L_2^2 + 2L_2L_{g3}C_3 \right) + I_2 + I_3 \\ A_{23} &= m_3L_2L_{g3}C_3 + I_3 \\ A_{31} &= m_3 \left(L_1L_{g3}C_{23} + L_2L_{g3}C_3 \right) + I_3 \\ A_{32} &= m_3L_2L_{g3}C_3 + I_3 \\ A_{33} &= I_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_1 &= - \left\{ m_2L_1L_{g2}S_2 + m_3 \left(L_1L_2S_2 + L_1L_{g3}S_{23} \right) \right\} \dot{\phi}_2^2 \\ &\quad - m_3 \left(L_1L_{g3}S_{23} + L_2L_{g3}S_3 \right) \dot{\phi}_3^2 \\ &\quad - 2 \left\{ m_2L_1L_{g2}S_2 + m_3 \left(L_1L_2S_2 + L_1L_{g3}S_{23} \right) \right\} \left(\dot{\phi}_0 + \dot{\phi}_1 \right) \dot{\phi}_2 \\ &\quad - 2m_3 \left(L_1L_{g3}S_{23} + L_2L_{g3}S_3 \right) \left(\dot{\phi}_0 + \dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 \right) \dot{\phi}_3 \\ B_2 &= + \left\{ m_2L_1L_{g2}S_2 + m_3 \left(L_1L_2S_2 + L_1L_{g3}S_{23} \right) \right\} \left(\dot{\phi}_0^2 + \dot{\phi}_1^2 \right) \\ &\quad - m_3L_2L_{g3}S_3\dot{\phi}_3^2 \\ &\quad + 2 \left\{ m_2L_1L_{g2}S_2 + m_3 \left(L_1L_2S_2 + L_1L_{g3}S_{23} \right) \right\} \dot{\phi}_0\dot{\phi}_1 \\ &\quad - 2m_3L_2L_{g3}S_3 \left(\dot{\phi}_0 + \dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 \right) \dot{\phi}_3 \end{aligned}$$

$$B_3 = - \left\{ m_2L_1L_{g2}S_2 + m_3 \left(L_1L_2S_2 + L_1L_{g3}S_{23} \right) \right\} \dot{\phi}_2^2$$

$$\begin{aligned} C_1 &= m_2L_1L_{g2}C_2 \\ &\quad + m_3 \left(L_1L_2C_2 + L_1L_{g3}C_{23} + L_2^2 + 2L_2L_{g3}C_3 \right) + I_2 + I_3 \\ C_2 &= m_3 \left(L_2^2 + 2L_2L_{g3}C_3 \right) + I_2 + I_3 \\ C_3 &= m_3L_2L_{g3}C_3 + I_3 \end{aligned}$$

$$C_4 = m_3 \left(L_1L_{g3}C_{23} + L_2L_{g3}C_3 \right) + I_3$$

$$C_5 = m_2L_1L_{g2}C_2$$

$$C_6 = m_3 \left(L_1L_2C_2 + L_1L_{g3}C_{23} + L_2^2 + 2L_2L_{g3}C_3 \right) + I_2 + I_3$$

$$C_7 = m_3 \left(L_2^2 + 2L_2L_{g3}C_3 \right) + I_2 + I_3$$

$$C_8 = m_3L_2L_{g3}C_3 + I_3$$

$$C_9 = I_3$$

$$\begin{aligned} B_1 &= - \left\{ m_2L_1L_{g2}S_2 + m_3 \left(L_1L_2S_2 + L_1L_{g3}S_{23} \right) \right\} \dot{\phi}_2^2 \\ &\quad - m_3 \left(L_1L_{g3}S_{23} + L_2L_{g3}S_3 \right) \dot{\phi}_3^2 \\ &\quad - 2 \left\{ m_2L_1L_{g2}S_2 + m_3 \left(L_1L_2S_2 + L_1L_{g3}S_{23} \right) \right\} \left(\dot{\phi}_0 + \dot{\phi}_1 \right) \dot{\phi}_2 \\ &\quad - 2m_3 \left(L_1L_{g3}S_{23} + L_2L_{g3}S_3 \right) \left(\dot{\phi}_0 + \dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 \right) \dot{\phi}_3 \\ B_2 &= + \left\{ m_2L_1L_{g2}S_2 + m_3 \left(L_1L_2S_2 + L_1L_{g3}S_{23} \right) \right\} \left(\dot{\phi}_0^2 + \dot{\phi}_1^2 \right) \\ &\quad - m_3L_2L_{g3}S_3\dot{\phi}_3^2 \\ &\quad + 2 \left\{ m_2L_1L_{g2}S_2 + m_3 \left(L_1L_2S_2 + L_1L_{g3}S_{23} \right) \right\} \dot{\phi}_0\dot{\phi}_1 \\ &\quad - 2m_3L_2L_{g3}S_3 \left(\dot{\phi}_0 + \dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 \right) \dot{\phi}_3 \end{aligned}$$

$$B_3 = - \left\{ m_2L_1L_{g2}S_2 + m_3 \left(L_1L_2S_2 + L_1L_{g3}S_{23} \right) \right\} \dot{\phi}_2^2$$

$$\begin{aligned} C_1 &= m_2L_1L_{g2}C_2 \\ &\quad + m_3 \left(L_1L_2C_2 + L_1L_{g3}C_{23} + L_2^2 + 2L_2L_{g3}C_3 \right) + I_2 + I_3 \\ C_2 &= m_3 \left(L_2^2 + 2L_2L_{g3}C_3 \right) + I_2 + I_3 \\ C_3 &= m_3L_2L_{g3}C_3 + I_3 \end{aligned}$$

$$C_4 = m_3 \left(L_1L_{g3}C_{23} + L_2L_{g3}C_3 \right) + I_3$$

$$C_5 = m_2L_1L_{g2}C_2$$

$$C_6 = m_3 \left(L_1L_2C_2 + L_1L_{g3}C_{23} + L_2^2 + 2L_2L_{g3}C_3 \right) + I_2 + I_3$$

$$C_7 = m_3 \left(L_2^2 + 2L_2L_{g3}C_3 \right) + I_2 + I_3$$

$$C_8 = m_3L_2L_{g3}C_3 + I_3$$

$$C_9 = I_3$$

① : Duralumin

② : COPNA mixture material

Fig.2.6 Geometry of synthetic-resin plate

Table 2.1 Dimension of jump robot

	Upper leg	Lower leg	Landing part	Total
Length [mm]	355	275	200	663
Breadth [mm]	87	112	246	-
Mass [mm]	2882	1990	923	5795

Table 2.2 Dimension of tension spring

	Lower spring	Upper spring
Length [mm]	53.0	119.0
Wire diameter [mm]	1.4	1.4
Spring constant [N/mm]	1.70	0.75

Table 2.3 Dimension of the motor

	Motor
Starting torque [Nm]	2.5
Continuous torque [Nm]	0.201
Maximum rotation of number [rpm]	7580
Mass [g]	480

Table 2.4 Dimensions of gear box

	Type A	Type B
Spur gear reduction gear ratio	2	3
Total reduction gear ratio	30	45

Table 2.5 Dimension of synthetic-resin

	Synthetic-resin
Young's modulus [GPa]	5.476
Fracture stress [MPa]	138.73
Density [g/cm ³]	1.30

Fig.3.1 Simulation model

$$\begin{aligned}
B_3 &= m_3 \left(L_1 L_{g3} S_{23} + L_2 L_{g3} S_3 \right) \left(\dot{\phi}_0^2 + \dot{\phi}_1^2 \right) + m_3 L_2 L_{g3} S_3 \dot{\phi}_2^2 \\
&\quad + 2m_3 \left(L_1 L_{g3} S_{23} + L_2 L_{g3} S_3 \right) \dot{\phi}_0 \dot{\phi}_1 + 2m_3 L_2 L_{g3} S_3 \left(\dot{\phi}_0 + \dot{\phi}_1 \right) \dot{\phi}_2 \\
C_1 &= -\alpha \left\{ \begin{aligned} &m_1 L_{g1} S_{01} + m_2 \left(L_1 S_{01} + L_{g2} S_{012} \right) \\ &+ m_3 \left(L_1 S_{01} + L_2 S_{012} + L_{g3} S_{0123} \right) \end{aligned} \right\} \\
&\quad + \beta \left\{ \begin{aligned} &m_1 L_{g1} C_{01} + m_2 \left(L_1 C_{01} + L_{g2} C_{012} \right) \\ &+ m_3 \left(L_1 C_{01} + L_2 C_{012} + L_{g3} C_{0123} \right) \end{aligned} \right\} \\
C_2 &= -\alpha \left\{ m_2 L_{g2} S_{012} + m_3 \left(L_2 S_{012} + L_{g3} S_{0123} \right) \right\} \\
&\quad + \beta \left\{ m_2 L_{g2} C_{012} + m_3 \left(L_2 C_{012} + L_{g3} C_{0123} \right) \right\} \\
C_3 &= -\alpha \left(m_3 L_{g3} S_{0123} \right) + \beta \left(m_3 L_{g3} C_{0123} \right)
\end{aligned}$$

である。ただし

m_i : 第 i リンクの質量

L_i : 第 i リンクの長さ

L_{gi} : 第 i リンクの質量中心までの距離

ϕ_i : 第 i リンクと第 $(i-1)$ リンクの相対角

$A_{11} \sim A_{33}$ は慣性項, $B_1 \sim B_3$ は遠心力・コリオリ力, $C_1 \sim C_3$ は重力項でロボットの諸元により求められる。

3・2 ロボットが地面から受ける反力の導出

第1リンクが地面から受ける反力の垂直成分を F とすると,

$$F = (m_1 + m_2 + m_3) \ddot{g}$$

$$\begin{aligned}
& - \left\{ m_1 L_{g1} S_1 + m_2 \left(L_1 S_1 + L_{g2} S_{12} \right) + m_3 \left(L_1 S_1 + L_2 S_{12} + L_{g3} S_{123} \right) \right\} \dot{\phi}_1^2 \\
& - \left\{ m_2 L_{g2} S_{12} + m_3 \left(L_2 S_{12} + L_{g3} S_{123} \right) \right\} \dot{\phi}_2^2 - m_3 L_{g3} S_{123} \dot{\phi}_3^2 \\
& - \left\{ m_1 L_{g1} S_1 + m_2 \left(L_1 S_1 + L_{g2} S_{12} \right) + m_3 \left(L_1 S_1 + L_2 S_{12} + L_{g3} S_{123} \right) \right\} \dot{\phi}_1 \\
& - 2 \left\{ m_2 L_{g2} S_{12} + m_3 \left(L_2 S_{12} + L_{g3} S_{123} \right) \right\} \dot{\phi}_1 \dot{\phi}_2 \\
& - 2 m_3 L_{g3} S_{123} \left(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 \right) \dot{\phi}_3 \\
& + \left\{ m_1 L_{g1} C_1 + m_2 \left(L_1 C_1 + L_{g2} C_{12} \right) + m_3 \left(L_1 C_1 + L_2 C_{12} + L_{g3} C_{123} \right) \right\} \ddot{\phi}_1 \\
& + \left\{ m_2 L_{g2} C_{12} + m_3 \left(L_2 C_{12} + L_{g3} C_{123} \right) \right\} \ddot{\phi}_2 + m_3 L_{g3} C_{123} \ddot{\phi}_3
\end{aligned}$$

である。

3・3 3リンク浮遊ロボットの角運動量の導出

地面から受ける反力が0以下となった瞬間を跳躍の瞬間とし、浮遊状態の運動はロボット全体の重心の放物運動として扱う。跳躍ロボットの重心回りの角運動量 P_G は、

$$P_G = a(\phi_2, \phi_3) \dot{\phi}_1 + b(\phi_2, \phi_3) \dot{\phi}_2 + c(\phi_2, \phi_3) \dot{\phi}_3$$

となる。また、第1リンクと地面をなす角速度 $\dot{\phi}_1$ は上式を変形すると、

$$\dot{\phi}_1 = \frac{P_0}{a(\phi_2, \phi_3)} - \frac{b(\phi_2, \phi_3)}{a(\phi_2, \phi_3)} \dot{\phi}_2 - \frac{c(\phi_2, \phi_3)}{a(\phi_2, \phi_3)} \dot{\phi}_3$$

となる。ただし、

$$a(\phi_2, \phi_3) = J_1 + J_2 + J_3$$

$$+ \frac{1}{M} \left\{ c_1 + c_2 + c_3 - 2c_4 \cos \phi_2 - 2c_5 \cos \phi_3 - 2c_6 \cos(\phi_2 + \phi_3) \right\}$$

$$b(\phi_2, \phi_3) = J_2 + J_3$$

$$+ \frac{1}{M} \left\{ c_2 + c_3 - c_4 \cos \phi_2 - 2c_5 \cos \phi_3 - c_6 \cos(\phi_2 + \phi_3) \right\}$$

$$c(\phi_2, \phi_3) = J_3$$

$$+ \frac{1}{M} \left\{ c_3 - c_5 \cos \phi_3 - c_6 \cos(\phi_2 + \phi_3) \right\}$$

$$c_1 = m_1 (m_2 + m_3) (L_1 - L_{g1})^2$$

$$c_2 = m_2 (m_1 + m_3) L_{g2}^2 + m_3 (m_1 + m_2) L_2^2 - 2m_2 m_3 L_2 L_{g2}$$

$$c_3 = m_3 (m_1 + m_2) L_{g3}^2$$

$$c_4 = m_1 (L_1 - L_{g1}) (m_2 L_{g2} + m_3 L_2)$$

$$c_5 = m_3 L_{g3} \left\{ m_1 L_2 + m_3 (L_2 - L_{g2}) \right\}$$

$$c_6 = m_1 m_3 (L_1 - L_{g1}) L_{g3}$$

$$M = m_1 + m_2 + m_3$$

である。

跳躍の瞬間の運動量を基に角運動量保存則から浮遊状態での接地部の角速度 $\dot{\phi}_1$ を求め、空中でのロボットの姿勢を解析した。ただし、 $a(\phi_2, \phi_3) \sim c(\phi_2, \phi_3)$ はロボットの諸元から求められる。

4. 実験方法

4・1 システム

本実験システムを Fig.4.1 に示す。ポテンシオメータに直流電源から電圧を入力し、ポテンシオメータの出力値を DSP に取り込む。その値を DSP で処理し、DSP から制御電圧を出力しアンプで増幅して DC モータに電力を供給する。

また、ポテンシオメータは跳躍ロボットの脚下段と接地部、脚下段と脚上段の相対角度を検出する。

4・2 跳躍実験

2 関節跳躍ロボットの各関節の角度を基にフィードバック制御を用いて跳躍運動を実行し、最大跳躍実験、前方・後方跳躍実験を行った。また、得られた関節角度から運動の数値解析を行い、実験との比較を行った。

4・3 着地実験

本跳躍ロボットは PD 制御を用いて運動制御を行っているため、着地シーケンスにおける速度成分のフィードバックゲインを増大させることによって、各関節でダンピング力を増大させ、着地時の衝撃を軽減できるかを前方跳躍と後方跳躍について、それぞれ制御時と無制御時の着地の姿勢及び転倒の有無を映像により検証を行った。

4・4 連続跳躍実験

減衰力を用いた着地制御の有用性を確認するため、前方跳躍と後方跳躍それぞれについて着地制御を用いた連続跳躍運動を行い、跳躍の再現性や跳躍の時間間隔から検証を行った。

Fig.4.1 System

5. 実験結果及び考察

5・1 跳躍実験結果

5・1・1 最大跳躍実験

実験により得た最大跳躍の検出角度と目標角度を Fig.5.1 に、数値解析により得た重心の軌道を Fig.5.2 に、跳躍の挙動を Fig.5.3 に、跳躍実験の連続写真を Fig.5.4 に示す。最大跳躍では Fig.5.1 に示すように指令値と関節角度に多少の遅れが見られるがほぼ一致しており、PD 制御による関節角度の軌道制御が行えていることが分かる。脚上段の縮み後の停動時に多少オーバーシュートがみられるが、これは接地に伴って起こる衝撃によりモータの発生トルク限界を超えたため停止できなかったと考えられる。跳躍最大高さは 220[mm]であり、跳躍高さ-全長比は約 0.33 と高い値が得られた。解析値は 290[mm]と実験値より高い値が得られたが、数値解析では配線や跳躍時の接地部の滑りによる損失などを考慮していないためと考えられる。また、着地時の接地部の傾きは実験では地面にほぼ水平、解析では接地部前部の高さが 37[mm]と結果が異なるが、実験では配線を引き上げながら跳躍を行っているため、後方向への回転が弱まった影響と考えられる。

5・1・2 前方跳躍実験

実験より得た前方跳躍の検出角度と目標角度を Fig.5.5 に、数値解析により得た重心の軌道を Fig.5.6 に、跳躍の挙動を Fig.5.7 に、跳躍実験の連続写真を Fig.5.8 に示す。Fig.5.5 に示すように目標角度と検出角度はほぼ一致しており、フィードバック制御による関節角度の軌道制御が可能であるといえる。跳躍移動距離は実験値では前方 330[mm]、解析値では前方 300[mm]と実験値が解析値より大きな値を得られた。これは実験では着地時に配線を踏まないように前方に張力を加えた状態で跳躍実験を行ったためと考えられる。また、着地時の接地部の傾きは実験では地面にほぼ水平、解析では接地部後部の高さが 50[mm]と結果が異なるが、実験では跳躍時に数値解析では考慮していない接地部の滑りが発生しており、これにより前方向への回転が弱まった影響と考えられる。

5・1・3 後方跳躍実験

実験より得た後方跳躍の検出角度と目標角度を Fig.5.9 に、数値解析により得た重心の軌道を Fig.5.10 に、跳躍の挙動を Fig.5.11 に、跳躍実験の連続写真を Fig.5.12 に示す。Fig.5.9 に示すように目標角度と検出角度はほぼ一致しており、フィードバック制御による関節角度の軌道制御が可能であるといえる。跳躍移動距離は実験値では後方 300[mm]、解析値では後方 330[mm]と解析値が実験値より大きな値を得られた。これは実験では配線を引しながら跳躍を行っているため、跳躍移動距離が短くなったと考えられる。また、着地時の接地部の傾きは実験では接地部後部の高さが 10[mm]、解析では接地部前部の高さが 20[mm]と結果が異なるが、実験では跳躍時に配線により前方向の力が加わり、後方向への回転が弱まった影響と考えられる。

5・2 着地実験結果

前方跳躍及び後方跳躍における着地実験を行い、速度ゲインを大きくとった制御時と無制御時の着地姿勢を映像から検証すると、無制御時には着地後に跳ね返り現象が確認されるが、制御時には各関節で衝撃が吸収されていることが分かる。これにより速度ゲインを大きくすることで減衰力を用いた着地制御を行えることを確認した。ここでは、前方跳躍の着地時の無制御時の挙動を Fig.5.13 に、制御時の挙動を Fig.5.14 に示す。

Fig.5.1 Change in angle of joint (maximum jumping)

Fig.5.2 Trajectory of gravity point (maximum jumping)

Fig.5.3 Result of simulation (maximum jumping)

Fig.5.4 Motion of maximum jumping

Fig.5.5 Change in angle of joint (forward jumping)

Fig.5.6 Trajectory of gravity point (forward jumping)

Fig.5.7 Result of simulation (forward jumping)

Fig.5.8 Motion of forward jumping

5・3 連続跳躍実験結果

前方・後方連続跳躍においても連続した各々の跳躍において跳躍高さ・跳躍移動距離に再現性があり，減衰力を用いた着地制御を行うことで連続跳躍運動を成功した．1 回目の着地から2 回目の跳躍の瞬間までの間隔は前方では約 0.8[s]，後方では約 0.44[s]という結果が得られた．後方跳躍は着地時に脚を曲げることで着地の衝撃と後方の運動量を同時に抑えることができるため，前方跳躍より早い間隔で2 回目の跳躍を行えたと考えられる．ここでは，前方連続跳躍の連続写真を Fig.5.15 に示す．

6. 結言

本研究では，2 関節劣駆動跳躍ロボットを開発し，跳躍の運動制御を行うことでその有用性を検証した．また，接地状態及び浮遊状態における運動をモデル化し，運動解析を実行した．それより，以下の結果を得た．

- (1) 3 リンク 2 アクチュエータの2 関節劣駆動跳躍ロボットを開発した．
- (2) フィードバック制御による軌道追従制御により，跳躍ロボットに跳躍運動を行うことが可能であることを確認した．
- (3) 劣駆動ロボットの数値解析を行い，接地状態及び浮遊状態の運動を解析した．
- (4) 跳躍ロボットに跳躍運動を実行させた結果，最大約 220[mm]の跳躍高さ，前方に最大約 330[mm]，後方に最大約 300[mm]の跳躍移動距離が得られた．
- (5) 着地時に速度ゲインを増大させることで各関節での衝撃吸収による着地制御の有用性を映像から確認し，これを利用した連続跳躍運動を実行し，連続跳躍運動に成功した．

以上のことから，本研究で開発した2 関節劣駆動跳躍ロボットは跳躍の運動制御及び減衰力を利用した着地制御が可能であり，また数値解析結果は実験値と良く一致しており数値解析の有用性を確認した．

7. 参考文献

- [1] 東 森充, 石井 抱, 金子 真: “無次元解析に基づくなぞり型脚式ロボットの設計”, 日本機械学会論文集 C, vol.71, no.704, pp.1342-1348, 2005.
- [2] 大橋 栄二郎, 大西 公平: “跳躍機械の跳躍高さ制御”, 電気学会論文誌 D, 産業応用部門, vol.124, no.7, pp.660-665, 2004.
- [3] GENG T, LI X, SHEN G, XU X: “Ballistic Flip of A Planar One-legged Robot in Simulation”, Proc Am Control Conf, 2002, vol.3, pp.2505-2509, 2002.
- [4] ARIKAWA K, MITA T: “Design of Multi-DOF Jumping Robot”, Proc IEEE Int Conf Rob Autom, 2002, vol.4, pp.3992-3997, 2002
- [5] 三平: “初期角運動量を有する劣駆動飛遊系の姿勢制御”, 日本ロボット学会誌, 19(4), pp.461-467, 2001.
- [6] 大久保: “自己振動を利用した跳躍機械に関する研究”, “小出力アクチュエータを用いた跳躍の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.5, pp.633-639, 1998
- [7] HIGASHIMORI, M.: Dimensional Analysis Based Design on Tracing Type Legged Robots Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2005, 2005
- [8] 林: “腕の振り込みを応用した振り式跳躍機械”, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.4, pp.528-534, 2001

Fig.5.9 Change in angle of joint (backward jumping)

Fig.5.10 Trajectory of gravity point (backward jumping)

Fig.5.11 Result of simulation (backward jumping)

Fig.5.12 Motion of backward jumping

Fig.5.13 Photo of jump robot without landing control

Fig.5.14 Photo of jump robot with landing control

Fig.5.15 Motion of continuous jumping