

3106 2 関節跳躍ロボットの設計製作と実験

Study of Two-Joint Articulated Jumping Robot

○ 田中 嵩悠 (群馬大学)
早川 智久 (群馬大学)

小林 宏行 (東洋製罐)
正 小島 宏行 (群馬大学)

Takahiro Tanaka, Gunma university, 1-5-1 Tenjincho, Kiryu, Gunma
Hiroyuki Kobayashi, Toyo Seikan Kaisha, LTD., 1-3-1 Uchisaiwaicho, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8522 Japan
Tomohisa Hayakawa, Gunma university
Hiroyuki Kojima, Gunma university

Key Words: Harmonic reduction gear, Two-joint jumping robot, Simulation of the jumping motion

1. 緒言

高低差のある2地点の間を速やかに移動する手段として跳躍運動ができるロボットが提案されている。回転関節型の跳躍ロボットでは、バネやストッパー機構などでリンクモーションを拘束することで跳躍動作を実現している研究が多く、これらの機構を搭載せず跳躍動作が可能であるかを検証した研究は少ない。本研究では、2関節ロボットを試作し、跳躍動作を実現するための運動制御法および着地後の姿勢制御法について述べる。着地後の姿勢制御の有用性や跳躍動作の再現性を確認するため、連続跳躍についても検証する。また、ロボットの跳躍動作を解明するため、数値計算を行い実験結果と比較し考察する。

2. 実験の概要

2.1 実験装置

試作した2関節型ロボットは、基礎リンク、リンク1、リンク2から構成されており、ハーモニックドライブおよびエンコーダー体型のDCモータにより駆動される。各リンクの可動範囲は $0^\circ \leq \theta_1 \leq 180^\circ$ 、 $-65^\circ \leq \theta_2 \leq 95^\circ$ 、総重量は約1.3kgである。

2.2 実験方法

・ 跳躍運動生成のフィードフォワード制御

試行錯誤的に跳躍可能な制御法を模索し、この実験から制御トルクをパルス状に与えることで跳躍可能であることを見出した。各リンクの動作による影響を確認するため以下の表1、表2に示す実験について検証する。 $\tau_{11} = 0.63\text{Nm}$,

$\tau_{12} = \tau_{21} = -3.15\text{Nm}$, $\tau_{13} = 3.15\text{Nm}$ とし、全実験において

$t_{1a} = t_{2a}$ として、 $t_{1c} - t_{1b} = 40\text{msec}$, $t_{p0} - t_{1c} = 290\text{msec}$ とする。

・ 着地後から初期姿勢移行の姿勢制御

着地後に初期姿勢に移行するように各リンクを作動させ、姿勢制御を行う。まず、姿勢制御開始時における姿勢の状態を取得し制御時間 $t_{p1} - t_{p0}$ を200msecとして取得した姿勢角をP制御により維持する。次に t_{p0} で取得したリンク1の姿勢角 θ_1 の状態で以下の場合に分ける。

(1) $\theta_1 > 60^\circ$ のとき制御時間 $t_{p2} - t_{p1}$ を1000msecとし

$\tau_1 = 0.315\text{Nm}$, $\tau_2 = 0.63\text{Nm}$ を与え、 $\theta_1 = 75^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$ を目標角として各リンクを動かす、制御時間 $t_{p3} - t_{p2}$ を1200msecとして $\tau_1 = 0.315\text{Nm}$, $\tau_2 = 0.4725\text{Nm}$ を与え、初期姿勢である $\theta_1 = 90^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$ となるように姿勢制御を行う。

(2) $\theta_1 \leq 60^\circ$ のとき制御時間 $t_{p2} - t_{p1}$ を1000msecとし

$\tau_1 = 0.4725\text{Nm}$, $\tau_2 = 0.63\text{Nm}$ を与え、 $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$ を目標角として各リンクを動かす、制御時間 $t_{p3} - t_{p2}$ を1200msecとして $\tau_1 = 0.63\text{Nm}$, $\tau_2 = 0.4725\text{Nm}$ を与え、初期姿勢である $\theta_1 = 90^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$ となるように姿勢制御を行う。

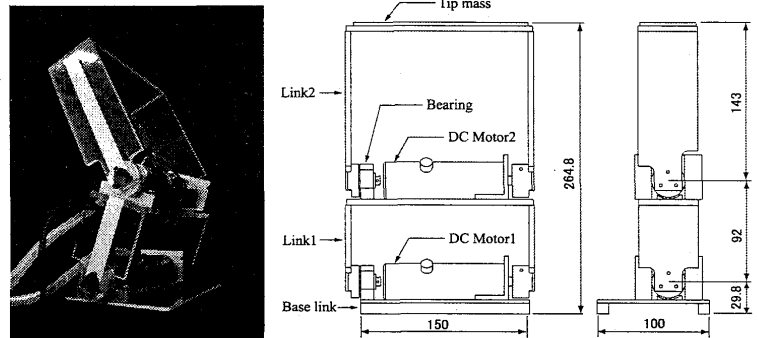


Fig.1 Photograph and drawing of the experimental device

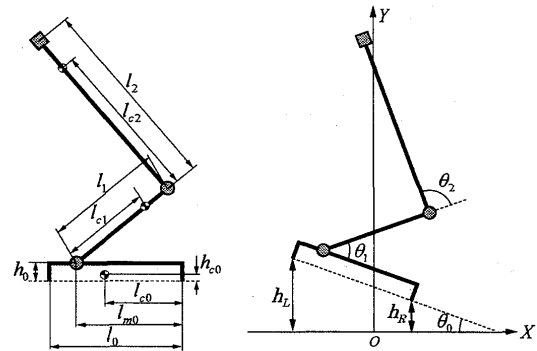


Fig.2 Schematic diagrams of the jumping robot

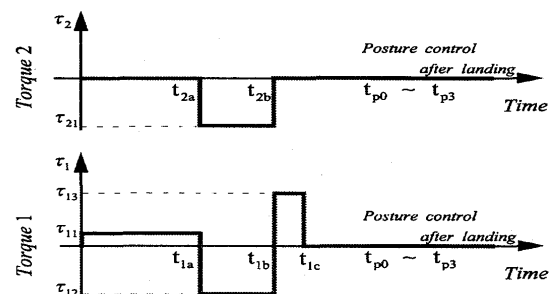


Fig.3 Command signal of torque

3. 実験結果

実験2の結果を図4、連続跳躍の実験結果を図5、Case3の実験の写真を図6に示す。

4. 数値計算

図2のモデルから、Lagrangeの方程式により運動方程式を導出し、Case3のパラメータでRunge-Kutta法により数値計算を行う。求めた運動方程式は、

$$\begin{bmatrix} M_{00} & M_{01} & M_{02} \\ M_{10} & M_{11} & M_{12} \\ M_{20} & M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_0 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_0 \\ G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_0 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

と表され、 $M_{00} \sim M_{22}$ は慣性項、 $C_0 \sim C_2$ はコリオリ力・遠心力、 $G_0 \sim G_2$ は重力項を表す。

Table1 Experiment1 Unit[msec]				
	t_{1a}	$t_{1b}-t_{1a}$	t_{2a}	$t_{2b}-t_{2a}$
Case1	150	70	150	70
Case2	160	70	150	70
Case3	170	70	150	70
Case4	180	70	150	70
Case5	190	70	150	70

Table2 Experiment2 Unit[msec]				
	t_{1a}	$t_{1b}-t_{1a}$	t_{2a}	$t_{2b}-t_{2a}$
Case6	170	50	170	70
Case7	170	60	170	70
Case8	170	70	170	70
Case9	170	80	170	70
Case10	170	90	170	70

注)Case8はCase3と同一の実験である。

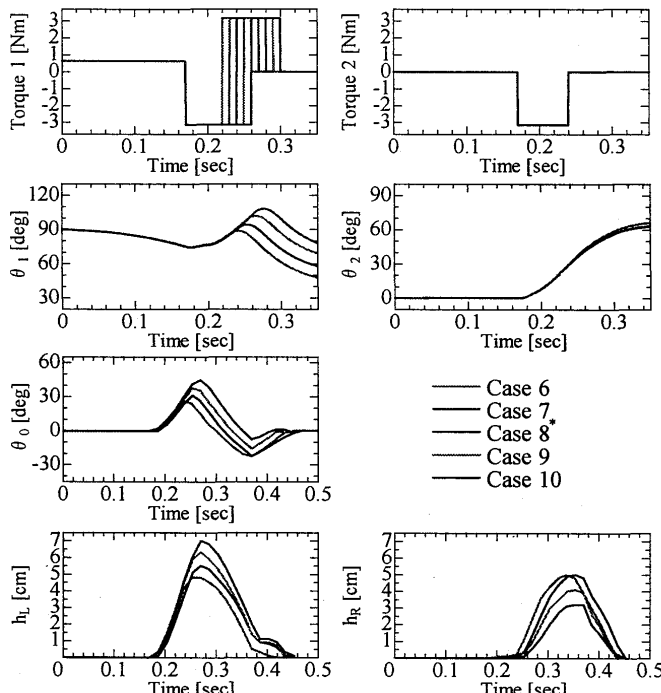


Fig.4 Experimental results of experiment 2

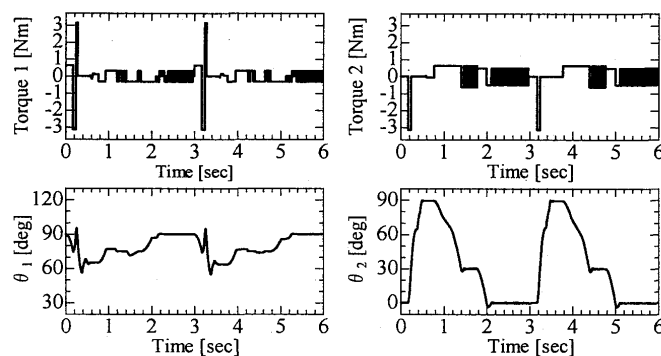


Fig.5 Experimental results of two times jumping

関節トルクとなるアクチュエータの式を

$$\tau_i = N_i \tau_{mi} - N_i^2 J_{mi} \ddot{\theta}_i - D_i \dot{\theta}_i \quad (i=1,2) \quad (2)$$

で与える。ここで $N_i \tau_{mi}$ は制御トルク、 D_i は回転粘性係数である。跳躍中はロボットの重心はX軸方向には等速運動、Y軸方向には自由落下運動を行い、図2で示したO-X-Y座標の点Oまわりの角運動量は保存されるので、

$$L^2 = \sum_{i=0}^2 r_{ci} \times m_i \dot{r}_{ci} + \sum_{i=0}^2 J_{ci} \omega_i \quad (3)$$

となる。

回転粘性係数を $D_1 = 0.07 \text{ Nms/rad}$, $D_2 = 0.16 \text{ Nms/rad}$ として与え、数値計算で得られた跳躍動作を図7に示す。

5. 考察

Case6の実験では着地後の重心位置が不安定であったため転倒し失敗した。Case6を除く全ての実験で跳躍運動および着地後の姿勢制御に成功した。足の高さ $h_L = h_R$ となる高さを跳躍高さとして実験1では跳躍高さとなる時間が順に長くなり、実験2では跳躍高さが順に低くなる傾向を示した。

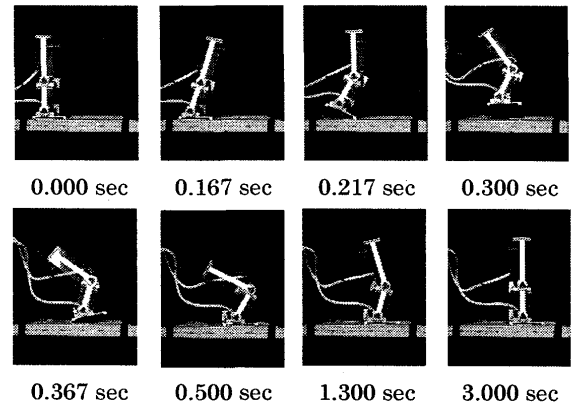


Fig.6 Photograph of the jumping motion

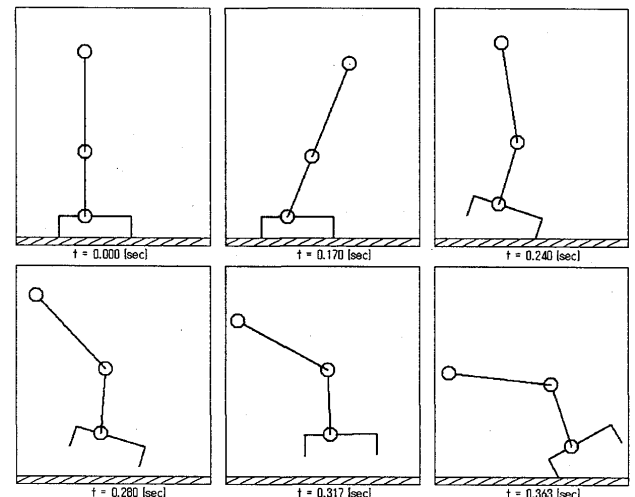


Fig.7 Simulation result of the jumping motion

数値計算では跳躍高さは3.4 cmであり、基礎リンクが床面から離れ跳躍してからロボットの重心位置が1.6 cm Y軸正方向へ推移した。図5より二回目の跳躍においても一回目と同様の動作傾向を示しており再現性を確認できる。

6. 結言

本研究により以下の結論を得た。

- パルス状に制御トルクを与えることで跳躍動作は実現できることが確かめられた。
- 制御時間の変化は、基礎リンク左右端の到達高さの変化、跳躍高さ及びその時間に影響を与える。
- 連続跳躍の実験から着地後の姿勢制御は有用であり、跳躍動作の再現性を確認することが出来た。
- 系の運動方程式を導き、数値計算から跳躍は可能であることが確認されたが、数値計算の結果は実験値と差異があり、ハーモニックドライブの弾性変形等を考慮した運動方程式を求める必要がある。

参考文献

- [1]早川智久, 小林宏行, Gustavo KATO, 小島宏行, “ハーモニック減速機と直流モータを用いた2関節跳躍ロボットに関する研究”, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会-2006 桐生- 講演論文集, pp.207-208, 2006
- [2]Gustavo KATO, Hiroyuki KOJIMA, Mamoru YOSHIDA, and Yusuke WAKABAYASHI, “Experiments on Motion Control of Two-Joint Articulated Hopping Robot with Stopper Mechanisms”, Journal of Robotics and Mechatronics Vol.17 No.1, pp.89-100, 2005
- [3]玄相晃, 上條敏, 美多勉, “動物の脚構造をモデル化した1脚走行ロボット-Kenken”, 日本ロボット学会誌 Vol.20 No.4, pp453-462, 2002