学術・技術論文

自己振動を利用した跳躍機械に関する研究

—高い跳躍の検討—

大久保 宏 樹^{*1} 中 野 栄 二^{*2} 藤 原 浩 幸^{*1} 松 下 修 巳^{*1}

Study of a Jumping Machine Using Self-energizing Spring

—High Jump—

Hiroki Okubo^{*1}, Eiji Nakano^{*2}, Hiroyuki Fujiwara^{*1} and Osami Matsushita^{*1}

The purpose of this research is to make a machine or a robot jump highly using small output actuators.

A jumping machine with a self-energizing spring system is introduced, which is designed to jump using small actuators and springs. Power for the self-energizing system is generated using small actuators. And it can jump.

The machine can jump or increase the jumping height in jumping phase when the motion is reasonable. The motion control trajectory of the angle of body link is introduced in this paper.

Computer simulations and experiment are performed to prove the validity of the concept of jumping method by means of the self-energizing system.

Key Words: Jumping Machine, Self-Energizing Spring, Jumping Phase, Jumping Height

1. は じ め に

現在まで様々な形態の跳躍ロボット [1] が開発、提案されてきた。特に有名なのは 1980 年代に Raibert らが開発した胴体と 1 脚から構成されるホッピングマシン [2] である。このタイプのロボットを対象とした研究は最近もなお行われており、ランニングロボットの安定性の研究 [3] [4] や新たな制御戦略を提案している研究 [5] などがある。

その一方で跳躍方法を工夫した研究が行われている。なお、1992 年以前の研究については参考文献 [1] を参照してもらうとし、ここではそれ以後の研究で提案された手法について以下に検討する。基本的には、どの跳躍ロボットも跳躍前にロボット内部に運動エネルギーを発生させ、これを利用し跳躍を行っている。

まず、機械要素のばねを利用して、跳躍を行うロボットが挙げられる。その中のほとんどのロボットは胴体と脚の間にばねを配置している。ばねの利用方法として、跳躍のためのエネルギー蓄積と連続跳躍を有利に行うためのエネルギーの保存の二つの役割が考えられる。参考文献 [1] にばねを跳躍のためのエネルギー蓄積に利用した研究が挙げられる。後者の研究としては田口ら [9] のものがある。その他、変わったところでは Michalska らのモデル [10] がある。これは脚先にばねをつけ、

ボールスクリューで変位させるタイプのロボットモデルである。参考文献 [10] では制御法に関する報告をしている。清谷らは昆虫の足を模範とした跳躍ロボット [11] を紹介している。これは胴体と脚から構成され、2 リンクの脚の間にばねを入れている。

林ら [12] は跳躍、姿勢制御に振子の回転を利用している。多リンク型のもものでは 5 リンクのジャンピングロボットモデルの姿勢制御の研究 [13] がある。

また、最近では跳躍移動を用いた小天体探査ローバの研究 [14]~[16] が注目されている。微小重力下での使用になるため跳躍移動は有効である。この小天体探査ローバの跳躍運動は三つの内部のトルカを回転させることにより実現している。宇宙ローバ同様、跳躍移動が有効に利用できるのはマイクロロボットである。この分野では最近、昆虫を規範とする跳躍マイクロロボットの研究 [17] が行われている。磁性体 (ロボット胴体) に弾性エネルギーを蓄え、これを解放することにより跳躍を実現するものである。

以上の諸研究に対して、本研究で扱う跳躍機械は自己振動を利用している [18]。この跳躍機械はばねとアクチュエータから構成されており、アクチュエータでばねにエネルギーを蓄積し、最終的に高い跳躍を実現するものである。ほとんどの跳躍機械がアクチュエータの最大出力と最大跳躍高さとは密接な関係にあるのに対し、本研究で扱う跳躍機械は関係しない。そのため、アクチュエータの出力が大きくない場合でも跳躍を行わせることが可能である。

筆者らは自己振動を利用した跳躍機械に対し、アクチュエータの出力が小さくても跳躍が可能であることを示している [18]。本論文では次の段階として自己振動を利用した跳躍機械に対し

原稿受付 1999 年 10 月 15 日

^{*1}防衛大学校

^{*2}東北大学

^{*1}National Defense Academy

^{*2}Tohoku University

Fig. 1 Jumping machine model

高い跳躍を実現させる手法の検討を行う。

2. 自己振動を利用した跳躍機械

本研究で扱う跳躍機械 (Fig. 1) は胴体部と脚部とから構成される。胴体部はばねの上の質点 (胴体部質点) と二つのリンク (胴体部リンク) とからなる。胴体部リンクは胴体部中心の質点のまわりを回転することができる。胴体部と脚部はばねで接続されている。脚部の質量は胴体部の質量に比べてかなり小さくつくられている。本論文では脚部の質量を無視して解析を行う。そのため、跳躍機械が空中に位置するときにはばねは常に自然長になる。

アクチュエータは胴体部リンクを胴体部中心の質点まわりに駆動するために二つ設ける。これらは胴体部リンク上に取り付けられ、胴体部リンクと脚部との角度を制御することができる。アクチュエータは二つのみで、ばねを直接制御するためのものは用いていない。しかし、胴体部リンクの運動が適切なものであれば跳躍機械はばねにエネルギーを蓄えることが可能である。

3. 1 自由度の跳躍運動

ここでは Fig. 2 に示されるような鉛直 1 自由度の跳躍運動を考える。十分な跳躍高さを得るまでの運動は二つに分けて考えることができる。跳躍機械が跳躍を始めるまでの期間 (跳躍準備期 Fig. 2 (a)~(e)) と跳躍開始後に目標の跳躍高さを得るまでの期間 (跳躍期跳躍高さ制御相 Fig. 2 (f)~(j)) である。跳躍期跳躍高さ制御相では Fig. 2 (f)~(j) を繰り返す中で跳躍を高くしていく。なお、跳躍機械が空中にあるときには脚部質量を無視しているため瞬時に胴体部リンク角を目標角度に制御できるものとする。胴体部リンク角を目標角度に設定した後、跳躍機械が空中にある間、胴体部リンク角速度は 0 を保つ制御を行う。

本論文では跳躍期跳躍高さ制御相の胴体部リンク運動について検討する。跳躍機械が空中にあるときには跳躍機械の持つエネルギーを増加させることはできない。そのため脚部下端接地時に胴体部リンクを適切に運動させることにより、跳躍機械の持つエネルギーを増加させるを試みる。

Table 1 The jumping machine's specifications

m_0	mass of the body [kg]
m	mass of the body link [kg]
r	displacement of the body mass [m]
k_j	spring constant [N/m]
θ	angle between the vertical line and the body link [rad]
l	length between the body mass and the body link mass [m]

Fig. 2 Motion of the jumping machine in a vertical line

脚部下端接地期間 (Fig. 2 (a)~(e), (g)~(j)) の運動方程式を示す。なお、静的安定時の胴体部質点の位置を $r = 0$ としている。

$$(m_0 + 2m)\ddot{r} - 2ml(\ddot{\theta} \sin \theta + \dot{\theta}^2 \cos \theta) + k_j r = 0 \quad (1)$$

各変数の定義は Table 1 のとおりである。

跳躍期跳躍高さ制御相における脚部下端接地期間は非常に短い。そのため、胴体部リンク軌道には時間の次数の低い、角速度の切り替えのないものを用いた方が実現しやすい。また、このような軌道を用いた方が解析も容易になる。そこで、脚部下端接地期間には胴体部リンク角速度が一定の軌道を用いることにする。

以上を考慮すると、胴体部リンク角度の軌道には次の 2 種類が考えられる。

$$\theta = \mp at + \theta_0 \quad (2)$$

θ_0 [rad] は脚部下端接地時の胴体部リンク角度、 a [rad/s] は脚部下端接地期間の胴体部リンク角速度の大きさを表している。ここで、どちらの軌道が適しているかを調べるために脚部下端接地期間に跳躍機械の持つエネルギーの増加量の割合 ΔE を計算する。

$$\Delta E = \frac{E_1 - E_0}{E_0} \quad (3)$$

E_0 [J] を脚部下端接地時に跳躍機械が持つエネルギー、 E_1 [J] を離陸時に跳躍機械が持つエネルギーとしている。

式 (2) を式 (1) に代入した式を用いて解析を行う。解は

$$r = c_1 \cos p_j t + c_2 \sin p_j t + A \cos (at \mp \theta_0) \quad (4)$$

となる。ただし、 $p_f^2 = k_j/(m_0 + 2m)$, $\delta = 2mla^2/k_j$, $A = \delta/\{1 - (a/p_f)^2\}$, である。脚部下端接地時を $t = 0$ とする。 g を重力加速度, 胴体部質点速度を $-v_0$ とすると

$$t = 0; \quad r = \frac{g}{p_f^2}, \quad \dot{r} = -v_0$$

と書ける。以上から

$$c_1 = \frac{g}{p_f^2} - A \cos \theta_0, \quad c_2 = -\frac{v_0}{p_f} \mp A \frac{a}{p_f} \sin \theta_0$$

となる。跳躍機械のパラメータの値を **Table 2** に示す。ここで式 (2) においてどちらの軌道が適しているかを調べる。 $E_0 = 1$, $a = p_f/6$, $p_f/8$, $p_f/10$ の場合の各 θ_0 における ΔE を計算する。結果を **Fig. 3** に示す。横軸に θ_0 , 縦軸に ΔE をとっている。 **Fig. 3** より以下のことが分かる。

- 胴体部リンク角軌道 $\theta = -at + \theta_0$ を用いる場合には ΔE を正にできるので, 跳躍期跳躍高さ制御相において跳躍を高くすることができる。しかし, 軌道 $\theta = at + \theta_0$ を用いると ΔE は負になるので, 跳躍を高くできない。
- 脚部下端接地時の胴体部リンク角度 θ_0 に対し ΔE の値が異なる。 θ_0 に応じて ΔE に極大値, 極小値がある。 ΔE が極大になるときの θ_0 を θ_{0p} とおく。 θ_0 は脚部下端接地期間における跳躍機械のエネルギー増加, 減少に影響がある。

以上より跳躍期跳躍高さ制御相において跳躍を高くできる場合の胴体部リンク軌道として

$$\theta = -at + \theta_{0p} \quad (5)$$

を用いる。

Table 2 The jumping machine's specifications

m_0	0.25 [kg]
m	0.2 [kg]
k_j	2500 [N/m]
l	0.067 [m]

Fig. 3 Energy rate ΔE versus the body link angle θ_0

4. 跳躍を高くするための解析

ここでは ΔE_0 と θ_{0p} の関係を調べる。式 (5) を式 (1) に代入した式を用いて解析を進める。なお, $a = p_f/3$, $p_f/5$, $p_f/7$ の3通りを計算する。その結果を **Fig. 4** に示す。横軸に E_0 , 縦軸に θ_{0p} を取っている。

Fig. 4 より各 a について E_0 が大きくなるに従い, θ_{0p} が一定値に収束することが分かる。この θ_{0p} の収束値を θ_{0d} とおく。

次に他の a に対しても同様の計算を行い, θ_{0d} を求める。 a と θ_{0d} の関係を **Fig. 5** に示す。 a の値が大きくなるに従い, θ_{0d} の値が大きくなっている。

次に跳躍開始時の胴体部リンク角を調べる。 $t = 0$ で $E_0 = 1$, $\theta = \theta_{0d}$ の場合の θ を **Fig. 6** に示す。横軸に時刻を (π/p_f) で除した無次元時間 τ , 縦軸に θ を取っている。跳躍開始時の θ の値がおおよそ同じ値 ($\pi/2$ より少し小さな値) をとっていることが分かる。

Fig. 4 Body link angle θ_{0p} versus initial energy E_0

Fig. 5 Body link angle θ_{0d} versus body link angular velocity a

Fig. 6 Body link trajectories

Fig. 4 より E_0 が小さいときには θ_{0p} をやや大きく設定する方が良いことが分かる。 E_0 が小さい場合は跳躍高さが低い場合であり、滞空時間も短い。したがって実際には、 E_0 が小さい場合には θ_{0p} を設定することは難しい。ここでは E_0 が小さいときには胴体部リンクは $\pi/2$ 周辺で運動をさせる。跳躍回数が増え、 E_0 がある程度大きくなったところで θ_{0d} を設定することにする。

本論文では θ_0 を跳躍回数 N (1 以上の整数) の一次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} \theta_0 &= \theta_{00} + \frac{\theta_{0d} - \theta_{00}}{N_d - 1}(N - 1) & (N \leq N_d) \\ \theta_0 &= \theta_{0d} & (N > N_d) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

θ_{00} [rad] は $N = 1$ のときの θ_0 を表し、通常約 $\pi/2$ を選ぶことになる。 N_d は $\theta_0 = \theta_{0d}$ となるまでの跳躍回数を表す。 $N > N_d$ では $\theta_0 = \theta_{0d}$ とする。

5. シミュレーションおよび実験

製作した跳躍機械を用いて鉛直 1 自由度の跳躍実験を行う。

5.1 実験装置

Fig. 7 に実験装置の様子を示す。跳躍機械は鉛直 1 自由度のワイヤにベアリングを介してつながれている。また跳躍機械の跳躍高さを計測するために胴体部中心はリニアポテンシオメータが取り付けられている。

跳躍機械は胴体部リンクに取り付けられているポテンシオメータで胴体部リンク角度を計測することができる。この値から制御入力を計算し、胴体部リンクを駆動する DC モータへ出力する。また、跳躍機械脚部下端にはタッチセンサを持ち、接地状態を知ることができる。

この実験装置のエネルギー損失をシミュレーションモデルに反映させるために、実験装置のエネルギー損失を調べる。 $\theta = \pi/2$ の姿勢を保持して跳躍機械をある高さから落とし、変位を測定する。横軸に時刻、縦軸に胴体部変位をとったものを Fig. 8 に示す。始めの高さを h_1 [m]、2 回目を h_2 [m]、3 回目を h_3 [m] とする。跳躍機械が空中にあるときに持つエネルギーはそれ

Fig. 7 Experimental system

Fig. 8 Energy loss of the experimental system

ぞれ $(m_0 + 2m)gh_1$, $(m_0 + 2m)gh_2$, $(m_0 + 2m)gh_3$ である。 Fig. 8 より

$$\frac{(m_0 + 2m)gh_2}{(m_0 + 2m)gh_1} \approx \frac{(m_0 + 2m)gh_3}{(m_0 + 2m)gh_2} \approx 0.25 \quad (7)$$

と読みとることができる。このエネルギー損失には衝突による損失、ワイヤとベアリングとの間の摩擦による損失、跳躍機械とリニアポテンシオメータとの間の摩擦による損失などが考えられる。

5.2 跳躍シミュレーションと実験

以下仮定を示す。

- 胴体部リンク角速度 $a = p_f/3$ 。
- 1 回目の跳躍で 0.04 [J] のエネルギー (跳躍高さ約 0.007 [m]) が得られたとする。本研究で跳躍機械脚部下端のタッチセンサは 0.007 [m] 未満の跳躍では反応しない。そのため実験での 1 回目の跳躍高さは約 0.007 [m] となる。跳躍シミュレーションでもこれに合わせることにする。
- 脚部下端接地時の胴体部リンク角度 θ_0 の条件は $N_d = 5$, $\theta_{00} = \pi/2$, $\theta_{0d} = 0.6\pi$ [rad] とする。 $a = p_f/3$ の場合には $\theta_{0d} = 0.825\pi$ [rad] が望ましい。しかし、この値は本実

Fig. 9 Simulation result. Jumping height

Fig. 11 Simulation result. Jumping height

Fig. 10 Experimental result. Displacement of the jumping machine

験で用いた跳躍機械の胴体部リンク可動範囲外であるため $\theta_{0d} = 0.6\pi$ を用いることにする。

- 脚部下端接地期間では 75% のエネルギーが損失する。 $N > 1$ の跳躍期における跳躍開始時のエネルギーの 25% が跳躍機械が空中にあるときに持つエネルギーになる。

Fig. 9 に跳躍回数に対する跳躍高さを示す。横軸に跳躍期の跳躍回数 N 、縦軸に跳躍高さ h をとっている。 N が大きくなるに従い、 h が大きくなっている。しかし、 h の増加の割合が N が増えるに従って小さくなっている。

次に同様の条件で行った実験結果を Fig. 10 に示す。横軸は時刻 t [s]、縦軸は跳躍機械胴体部変位 r [m] と脚部下端の接地状態を表している。 Fig. 9 の跳躍シミュレーション結果とほぼ同様の結果が得られている。

次に少し良い条件で跳躍シミュレーションを行う。以下に仮定を示す。

- 胴体部リンク角速度 $a = p_f/3$ 。
- 1 回目の跳躍で 0.04 [J] のエネルギー（跳躍高さ約 0.007 [m]）が得られたとする。
- 脚部下端接地時の胴体部リンク角度 θ_0 の条件は $N_d = 5$, $\theta_{00} = \pi/2$, $\theta_{0d} = 0.825\pi$ [rad] とする。
- 脚部下端接地期間では 50% のエネルギーが損失する。

Fig. 11 に跳躍回数に対する跳躍高さを示す。 $N > 7$ において約 0.28 [m] の跳躍高さが得られている。

Fig. 9 と Fig. 11 を比較すると、自己振動を利用した跳躍機械は着地時のエネルギー損失が小さい場合には有効であることが分かる。逆に着地時に大きなエネルギー損失が生じる場合には向いていない。このような環境では 1 回のみの跳躍を行うタイプの跳躍機械の方が有効である。

6. お わ り に

自己振動を利用した跳躍機械に高い跳躍を実現させるための手法を示した。

高い跳躍を得るためには脚部下端接地時の姿勢と脚部下端接地期間の胴体部リンク運動が重要な要因となることが分かった。本論文では胴体部リンク運動に等角速度運動を用いた。胴体部リンク角速度の大きさに応じて脚部下端接地時における最適な胴体部リンク角が存在することが分かった。この角度を設定することにより高い跳躍が得られることをシミュレーションと実験から確認した。

参 考 文 献

- [1] 中野栄二, 大久保宏樹: “跳躍ロボット全般について”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.3, pp.342-347, 1993.
- [2] M.H. Raibert: Legged Robots That Balance. MIT Press, 1986.
- [3] M. Ahmadi and M. Buehler: “A Control Strategy for Stable Passive Running,” Proc. of the 1995 IEEE Int. Conf. on Intell. Sys. and Robots., pp.152-157, 1995.
- [4] M. Ahmadi and M. Buehler: “Stable Control of Simulated

- One-Legged Runnig Robot with Hip and Leg Compliance," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.13, no.1, pp.96-104, 1997.
- [5] C. Francois and C. Samson: "A New Approach to the Control of the Planar One-Legged Hopper," Robotics Research, vol.17, no.11, pp.1150-1166, 1998.
- [6] K. Tani and M. Shirai: "A Jumping Machine Using the Energy Stored in Springs," IFToMM-jc Int. Symp. on Theory of Machines and Mechanisms, vol.1, pp.265-270, 1992.
- [7] 大久保宏樹, 中野栄二, 木村浩: "ばねとアクチュエータによる跳躍機械の構成法", 日本ロボット学会誌, vol.10, no.7, pp.948-954, 1992.
- [8] H. Okubo, E. Nakano and H. Kimura: "Motion of A Jumping Machine in Two Dimensional Space," Proc. of 1993 Int. Conf. on Advanced Robotics, pp.541-546, 1993.
- [9] 田口幹, 上橋洋一郎, 浅羽重彦: "跳躍ロボットの研究", 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1207-1208, 1994.
- [10] H. Michalska, M. Ahmadi and M. Buehler: "Vertical Motion Control of a Hopping Robot," Proc. of the 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2712-2717, 1996.
- [11] 清谷進吾, 五百井清, 児島忠倫: "跳躍型移動ロボットの研究(第2報)—ばね開放時の打ち出し速度に関する検討—", 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.521-522, 1998.
- [12] 林良太, 松園博幸, 中田祐貴, 肥田昭: "振り式跳躍機械の姿勢制御実験", 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.925-926, 1999.
- [13] 南澤権, 池田貴幸, 美多勉: "ジャンプロボットの可変拘束姿勢制御", 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.867-868, 1999.
- [14] 吉光徹雄, 中谷一郎, 久保田孝, 黒田洋司, 足立忠司, 斎藤浩明: "小惑星探査用ローバの新移動メカニズム", 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1463-1464, 1998.
- [15] 花又健一, 國井康晴, 吉光徹雄, 加藤宙, 久保田孝: "微小重力下におけるホップロボットの移動最適化の検討", 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1103-1104, 1999.
- [16] 吉光徹雄, 久保田孝, 中谷一郎: "小天体探査ローバの行動計画", 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1105-1106, 1999.
- [17] 古谷淳二, 下山勲, 三浦宏文: "跳躍マイクロロボットの研究", 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.993-994, 1994.
- [18] 大久保宏樹, 半田実, 中野栄二: "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.

大久保宏樹 (Hiroki Okubo)

1964年7月19日生。1988年東北大学工学部機械工学第二学科卒業。1993年同大学大学院工学研究科機械工学第二専攻博士課程修了。博士(工学)。同年同大学工学部助手。1996年同大学大学院情報科学研究科助手。1997年1月防衛大学校助手。同年10月講師。跳躍機械, 不整地移動ロボットの研究に従事。日本機械学会所属。(日本ロボット学会正会員)

藤原浩幸 (Hiroyuki Fujiwara)

1970年2月13日生。1993年東北大学工学部機械工学第二学科卒業。1998年同大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻博士課程修了。博士(情報科学)。同年防衛大学校助手。不整地移動ロボットの研究に従事。日本機械学会所属。(日本ロボット学会正会員)

中野栄二 (Eiji Nakano)

1942年3月24日生。1970年東京大学大学院工学研究科産業機械工学専門課程博士課程修了。工学博士。同年通産省工業技術院機械技術研究所入所。1976~1977年米国スタンフォード大学人工知能研究所研究員。1987年東北大学工学部教授。1993年同大学大学院情報科学研究科教授。全方向移動ロボット, 不整地移動ロボット, 知能ロボット等の研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)

松下修巳 (Osami Matsushita)

1944年12月1日生。1972年東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻博士課程満期退学。1972年日立製作所。1993年5月防衛大学校教授。工学博士。ロータダイナミクス, 磁気浮上の研究に従事。日本機械学会, ASME, 日本航空宇宙学会所属。