

自立型脚式走行ロボットの開発

－ホッピング機構の開発－

野田道広*, 大泉哲哉

Development of an Autonomous-Legged Robot for Running －Development of a Hopping Mechanism－

NODA Michihiro* and OIZUMI Tetsuya

A running robot has a flight period during which all legs lose contact with the ground at the same time. Therefore, it requires a control system that calculates an appropriate position of the leg to regulate stability of that movement until the next touchdown. The control system presented herein is effective in maintaining balance against external disturbances. To develop such a robot system, we have been developing a one-legged hopping robot as the first step. The leg consists of electrical actuators and a spring to be installed in an autonomous robot. In this case, it is difficult for the robot even to continue hopping. For that reason, we first developed a hopping mechanism as a leg for the robot.

Keywords: Hopping robot, Legged robot, Hopping mechanism

1. はじめに

近年、相次いでヒューマノイド型ロボットが発表され、その歩行性能がめざましく向上している。そんな中、2006年1月には走ることでASIMOが発表され、TVに登場するなど、脚式ロボットによる走行に注目が集まっており、盛んに研究されてきている。

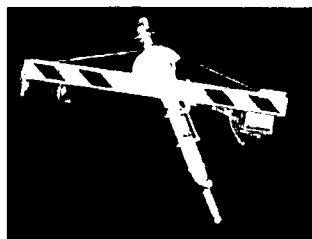
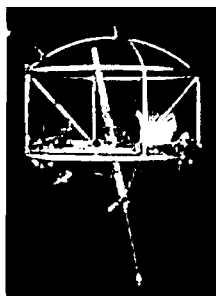
跳躍走行ロボットには両脚が床面から同時に離れる跳躍期間があり、次の接地までに、運動の安定性を考慮した脚接地条件を判断して接地動作に入る必要がある。本研究ではそのようなシステムを開発するための基礎研究として一脚の脚式走行ロボットの開発を行なっている。この分野の研究は約20年前より行われており、図1(a)に示すRaibertによるロボット[1]や、東北大学の江村研究室によるロボットなどが挙げられる[2]。これらのロボットは空気や油圧シリンダを用いたアクチュエータで脚部を構成し、作動流体供給源を外部に設置して走行を行なっている。別のタイプのロボットとして、図1(b)のBuehlerによるロボット[3]

がある。こちらは圧縮バネと直動アクチュエータを用いて脚部を構成しており、自立型の走行ロボットを実現しやすい構成となっている。

本研究では平成15年度まで本校専攻科の久保が中心になって行った研究[6]を引継ぎ、Buehlerのロボットを参考に圧縮バネと電動アクチュエータを用いて脚部を構成し、まずは跳躍部機構の実現を試みている。

2. ロボットの構成

ロボットの概略を図3に示す。ボディの重心に直交座標系をおき、紙面に垂直にY軸を取っている。図2は、Y軸方向から見ており、脚が地面に接地している瞬間を描いている。ボディと脚部でロボットを構成し、脚部はボディ重心位置でX軸まわりとY軸まわりの回転のみができるようボディに拘束されている。脚部動作によるボディの揺動を抑えるため、中心から離れた位置に質量を分布させることにより、ボディには脚部に比べて大きな慣性モーメントを持たせる。



(a) Raibert のロボット[4] (b) Buehler のロボット[5]

図1 跳躍ロボットの例

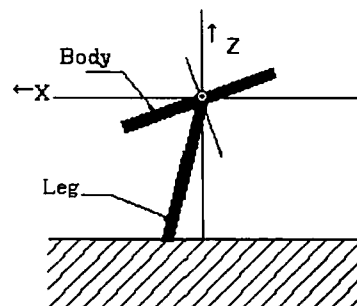


図2 Y軸方向から見たロボットの概略図

このロボットは遠隔操縦を前提としているため、姿勢制御に関する演算機能はロボットに搭載する。また、姿勢情報の取得には圧電ジャイロと加速度センサを使用する。

3. 脚部の概要

3.1 脚部の構造

このロボットは自立型として開発するため、脚部を圧縮バネと電動アクチュエータにより構成し、動力源を電気に統一する。

ロボットに連続跳躍運動をさせるためには、走行中のエネルギーの減衰を何らかの方法で補償する必要がある。前述したBuehlerのロボットの簡単なモデルを図3に示す。このロボットは脚部バネの固有振動に位相をあわせてバネを加振するという動的な方法で持続振動を実現している。そのため小出力モータで跳躍を持続させることができる。しかし、この方式では、不整地などで位相が大きくずれた場合、跳躍高度の補償を即座に行なえない欠点がある。そこで、本研究では、平成15年度に久保により提案された[6]、跳躍中に高度補償分に相当するだけバネを圧縮し、着地時に解放するという静的な発想で補償を行なう。そのため、本研究のロボットは図4のようにバネを下から圧縮する構造になっている。こうすることで、1跳躍分の遅れ程度ですばやく指令高度に追従することが可能となり、また、比較的出力の小さいモータで構成することができるようになる。

3.2 バネ圧縮量の計算

跳躍時のエネルギーロスを補償するためのバネ圧縮量を計算する。図5に跳躍中のロボットの図を示す。図5においてロボットの重量を M 、指令高度を H_d 、跳躍時間から求めた実高度を H とすると跳躍時のエネルギーロス ΔE は

$$\Delta E = Mg(H_d - H) \quad (1)$$

と表せる。バネを縮めることでこれを補償するので、バ

ネ定数を k 、バネの変位量を x とすると、バネに与えるエネルギーは次式ようになる。

$$\Delta E = \frac{1}{2} kx^2 \quad (2)$$

式(1)と(2)より補償変位量 x は次式のように求められる。

$$x = \sqrt{\frac{2Mg(H_d - H)}{k}} \quad (3)$$

跳躍中に x だけバネを縮めてやることで、ロボットを連続跳躍させることができる。

実際はモータに流す電流を制御する必要があるので、この x の値から電流値を算出する。図6にアクチュエータの構成図を示す。nutにバネ引き上げロッドを取り付け、バネを圧縮する。圧縮時のnutを引く力 F は次式となる。

$$F = kx \quad (4)$$

これをモータが出力するトルク T に変換する。ねじに作用する力を F とすると、ねじを締め付ける場合には T と F の間に次の式が成り立つ。

$$T = \frac{d_e F}{\varepsilon} \tan(\beta + \rho) \quad (5)$$

$$\rho = \tan^{-1} \mu \quad (6)$$

ここで、 μ はねじとナットの間の摩擦係数、 β はねじのリード角、 d_e はねじの有効半径、 ε はギアヘッドの減速比である。モータのトルク定数を k_T とすると、モータに流れる電流とトルクの間には

$$T = k_T I \quad (7)$$

が成り立つ。ロボットを制御する際は電流 I を算出して電流を制御する。

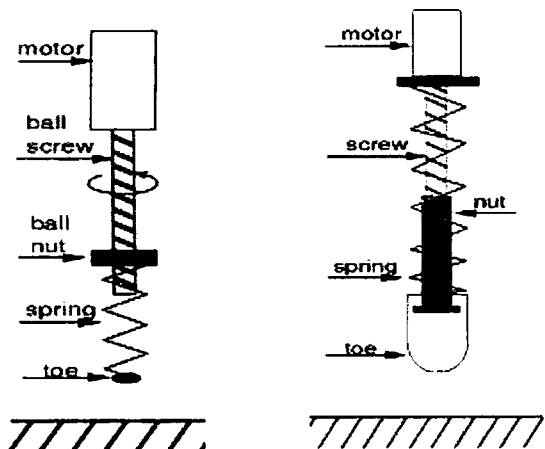


図3 Buehlerの脚部モデル[3]

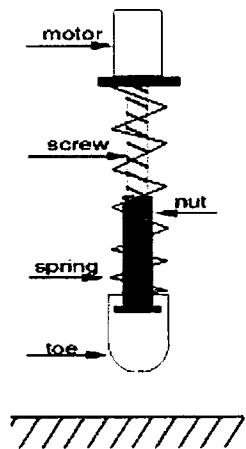


図4 本研究の脚部モデル

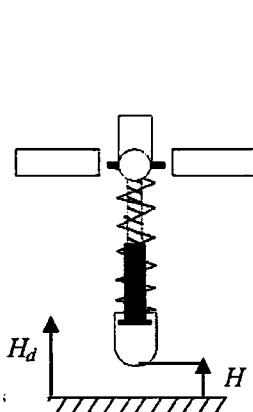


図5 跳躍中のロボット

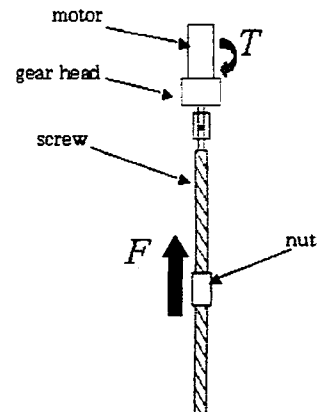


図6 脚に内蔵されたアクチュエータの構成

3.3 脚部の動作

この脚部の動作概要を図7に示す。脚部の動作は主に5段階に分けることが出来る。各段階の動作は以下になる。

- ① 節3.2で求めた式(7)を使用して電流値を計算し、バネを圧縮する。
- ② バネを圧縮した状態で着地する。
- ③ 着地の衝撃によってバネがさらに圧縮され、引き上げロッドへの負荷が無くなる。
- ④ モータを回転させ、ロッドを初期位置まで戻す。
- ⑤ 跳躍状態へと移行する。

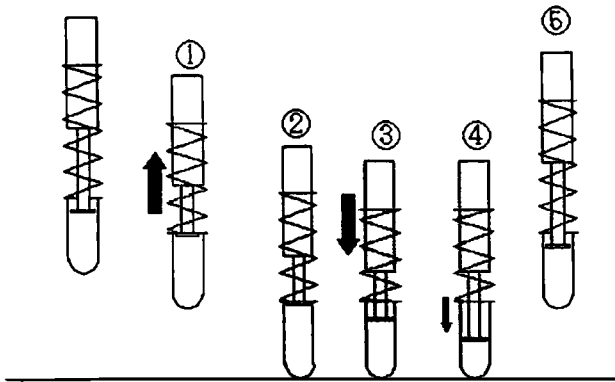


図7 脚部の動作

4. シミュレーション

ロボットの動作を確認するため、MSC社製3D運動解析ソフトWorking Model Motion(以下、WMM)を使用してシミュレーションを行った。このソフトウェアは3DCADであるSolidWorksで設計した部品データを読み込み、組立てや、動作解析をすることができる。しかし、本研究のロボットに必要なフィードバック制御などの制御系はWMM単独では実現できない。そのためWMMでは他のアプリケーションソフトウェアからWMM上の機構を制御できる機能が備えられている。そこで本研究ではMicrosoft社製表計算ソフトウェアExcelのマクロ記述言語Visual Basic for Applications (以下、VBA)を用いてWMM上のロボットを制御する。

久保が作成したシミュレーションモデルを図8に示す。このモデルは垂直跳躍の動作確認が目的なので、ボディや脚振り機構は取り付けしていない。代わりにボディに相当するバラストを取り付けている。このモデルを使用して、指令高度 H_0 を0.15[m]として動作させたところ、一回の跳躍に必要な補償量が約15[mm]であることと、着地している時間が約50[ms]であることがわかった。また、図9は3次元走行用のモデルである。従来のシミュレーションモデルは図9左のように必要な重量と慣性モーメントのみを考えたものであったので、製作困難な形状となっていた。そこで、脚部部品

を取り付け、さらに脚振りメカニズムを搭載することを想定した図9右のようなモデルを作製した。このモデルでシミュレーションを行った結果、図10のように8の字走行を実現できた。3次元走行の制御則にはCarnegie Mellon University教授のZeglinが考案した制御則[7]の一部を変更して使用している。Zeglin則ではロボットの運動をボールの反発運動に置き換えて考えている。しかし、この制御則は着地の際にボールが変形しないことを前提としているため、ロボットに使用するバネはバネ定数の大きいものを使用する必要がある。その結果、着地時間が約50[ms]と短くなっており、着地中のバネの解放が困難になると考えられる。そこで、実機を使用して動作実験を行った。

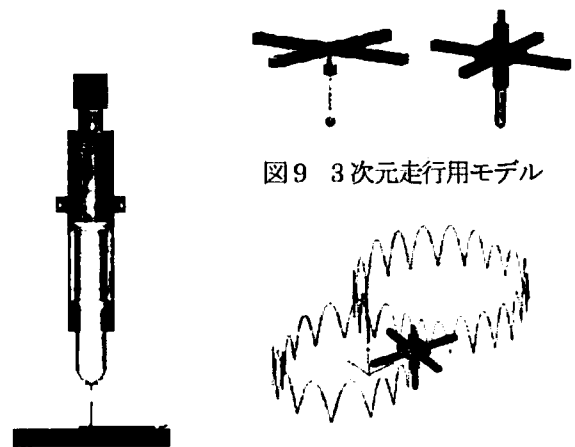


図8 シミュレーションの様子 図10 8の字走行の様子

5. 動作実験

図11は久保が製作した脚部の試作機構である。この機構を使用して動作実験を行なったがシミュレーションで確認してきた動作は実現できなかった。その原因を明らかにするために、図12のようにモータ軸にポテンシオメータを取り付け、モータの動作状態を検出する実験を行った。実験は、着地を検出するマイクロスイッチからの入力でモータを回転させ、そのときのポテンシオメータの出力をオシロスコープで観測するという方法で行った。

観測の結果、図13のようなノコギリ波状の信号が検出された。このグラフより、50[ms]の間ではモータが約3回以上回転できないことが分かった。引き上げロッドのネジのピッチが2[mm]のため、繰り出せるロッドは6[mm]以下である。シミュレーションの結果より、バネの補償量は最低でも10[mm]~15[mm]程度必要であると考えられるので、モータを回転させて引き上げロッドを元の位置まで繰り出す方法では、バネを完全に解放することができない。そのため、少ないモータ回転数でもバネを解放することのできる機構を開発することにした。

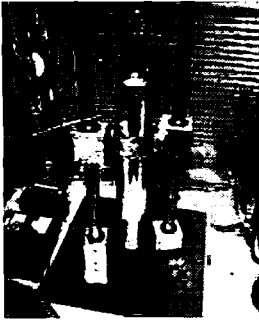


図 11 試作 1 号機

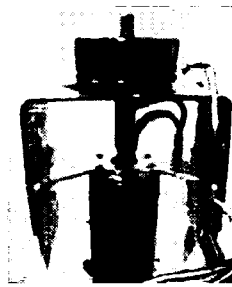


図 12 ポテンショメータを
取り付けた状態

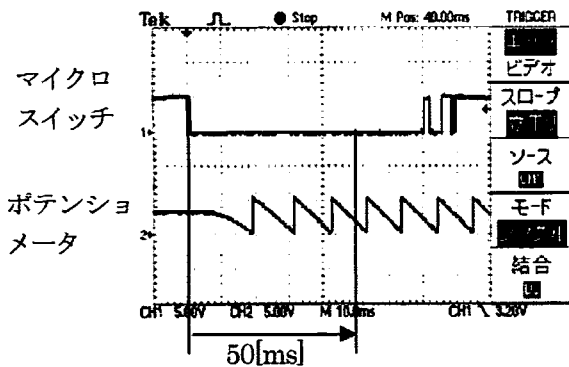


図 13 観測結果

ロッドは脚部の穴に入らない角度で固定されている。この状態で着地すると、着地の衝撃によってバネが圧縮される。ここでモータを回転させるとロッドが回転し、脚部の穴に入る角度となって、図17のようにバネが解放され、跳躍状態となる。跳躍状態に移行した後も、同じ方向にモータを回転させることでロッドが下がる。ロッドが充分下がったあとにモータを逆回転させると、ロッドが回転し、図18のように穴には入らない角度で固定され、次の補償が行えるようになる。



図16 補償時



図17 解放時



図18 次の補償時

6. バネ解放機構の開発

6. 1 機構の概要

着地中のバネの解放をロッドの繰り出し量に依存しないで行なえるように図14のような構造のバネ解放機構を考えた。図15のように引き上げロッドの一部を円筒状にすることにより、モータを回転させるとネジと引き上げロッドが共に回転する形状とした。また、ロッドの先端を長方形にして、一定の角度のときのみ脚部の長円形の穴に通るようにした。こうすることにより着地中にロッドを約1/8回転以下でバネを解放できる状態となる。

この機構の一連の動作を図16から図18に示す。図16は空中でバネを圧縮している状態である。このとき、引き上げ

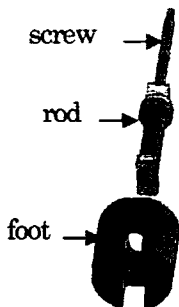


図 14 バネ解放機構



図 15 バネ引き上げロッド

6. 2 動作実験

脚部の改良によってバネの解放が可能になったので、跳躍プログラムを作成し、動作させて実験を行なった。

図19に製作した脚部を示す。この脚部は、摩擦抵抗を生じる摺動部分をできるだけ排して、跳躍の持続を実現することに目的を特化した。製作した脚部の諸元を表1に示す。ロボット質量は、バッテリーや制御部、姿勢制御機構などを搭載することを想定したバラストを取付け実現している。

実験条件は、バネ圧縮時のモータ電流を6.15[A]として、初期高度(脚先端と床面の距離) 130[mm]を与えて自由落下させ、ホッピング動作を開始している。5回跳躍したときの、着地信号とモータの回転の様子をポテンショメータで測定した電圧値のグラフを図20に示す。このときの跳躍高度は約0.08[m]であった。着地信号から、跳躍時間が一定となっているので、同じ跳躍高度を保っていることがわかる。その後、さらに跳躍回数を増やして実験を行なったが40回ほどの跳躍を上限として、解放機構が正常動作しなくなり静止した。その原因としては着地の衝撃などにより脚先が回転したため、解放機構が正しく動作できていないということが考えられる。

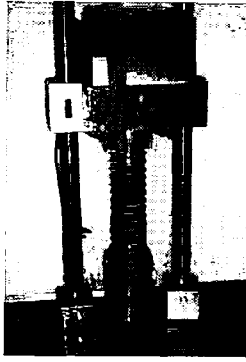


図 19 試作2号機

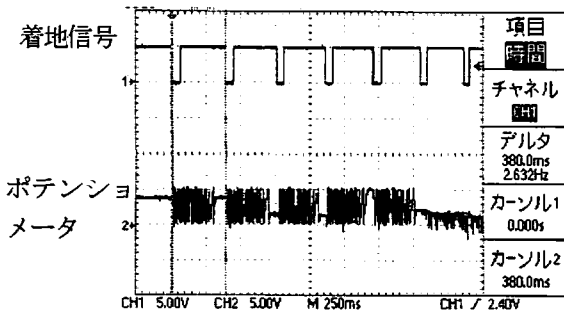


図 20 実験結果

表 1 試作2号機諸元

	unit	dimensions
Leg length	mm	350
Leg mass	kg	3
Spring constant	N/m	28400
Motor power	W	90
Robot mass	kg	11

7. 走行を考慮した脚部の開発

7.1 設計

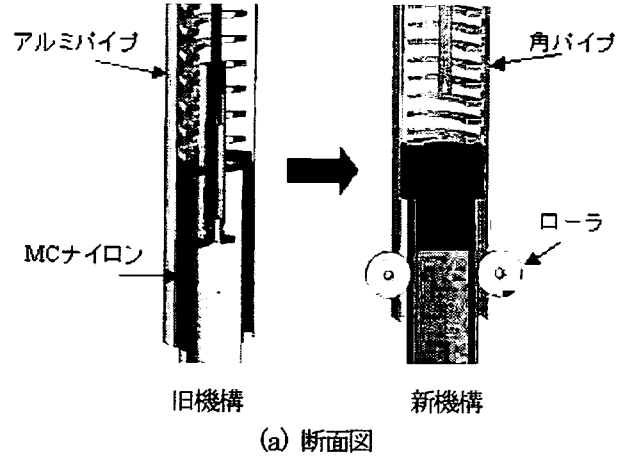
試作2号機は、バネ解放機構の動作を確認することが目的であったため、バネの両端にボディと脚先を取り付けただけの簡単な構造となっている。そのため斜めに接地した場合、バネの部分で曲がる可能性のため復元力がボディに正しく伝わらなくなる。従って走行を実現するためには、久保が提案したような脚部をパイプの中でスライドさせる構造にする必要がある。

久保が製作した機構は図21(a)左のように、アルミパイプの中でMCナイロン製の部品を直接スライドさせていた。しかし、ナイロンは熱膨張率がアルミの十倍以上大きいために、カバーとの摩擦熱や室温の変化などでスライド部が膨張し直径が大きくなり、繰り返しの動作させていると徐々に動き難くなった。そこで新しく設計した脚部では角パイプを使用し、内側のパイプをローラを介して摺動させることにした。これにより摺動部の抵抗はローラのころがり抵抗のみとなり、すばやくスライドできるようになる。また、

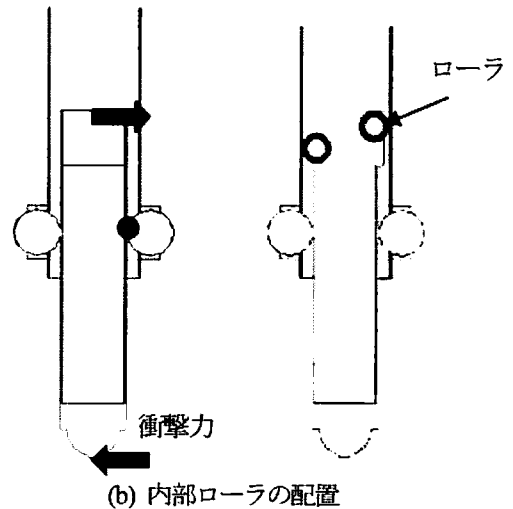
同時に着地時の脚先の回転も抑制される。

走行中に脚が地面に対して傾いて接地した場合、図21(b)左のようにローラを支点としたモーメントが発生し、内部で角パイプが接触してしまう。それを防ぐために内側のパイプにも図21(b)右のようにローラを取り付けた。

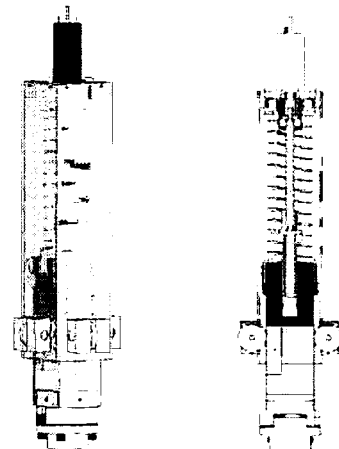
以上の点を考慮して設計した試作3号機を図21(c)に示す。



(a) 断面図



(b) 内部ローラの配置



(c) 設計した脚部とその断面

図21 脚部の設計

7. 2 動作実験

図22に製作した試作3号機を、表2にその諸元を示す。この機構で前述した実験と同様のプログラムで動作させた結果、約100回の連続跳躍に成功した。このときの跳躍高度は約0.05[m]と試作2号機るときよりも低くなった。これは角パイプやローラを取り付けたことにより脚部の重量が増加したためであると考えられる。

現在のプログラムは跳躍高度の減衰を補償する機能を省略している。跳躍時間からバネ圧縮量を計算し、モータに流す電流を制御するプログラムを構築することでさらに跳躍回数を増やすことができると考えられる。

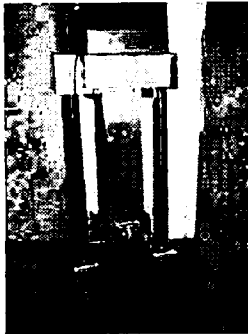


図 22 試作 3 号機

表 2 試作 3 号機諸元

	unit	dimensions
Leg length	mm	452.7
Leg mass	kg	3.9
Spring constant	N/m	28400
Motor power	W	90
Robot mass	kg	11.9

8. 脚振り機構の検討

脚部の連続跳躍が実現できたので、3次元走行を目指し、ボディや脚振り機構の製作を行っていく。

4章のシミュレーションではボディと脚の接続部にトルクを発生させて動作させているが、実際にトルクを発生させる際の機構として図23のような方法が考えられる。(a)はボディに設置したモータからチェーンなどを介して脚部回転軸にトルクを伝える方法である。この方法はBuehlerのロボットに使用されており、走行を実現している。(b)は電動や油圧などの直動アクチュエータにより、間接的にトルクを発生させる方法である。こちらはRaibertらによって実現されている。Buehlerの方法は3次元動作への拡張が難しく、また、着地の衝撃でチェーンが外れる恐れがある。Raibertらが図23(b)の方法で構築した一脚ホッピングロボットは3次元空間での動作を実現している。そこで、本研究ではこちらのメカニズムを使用して脚振り機構を設計していこうと考えている。

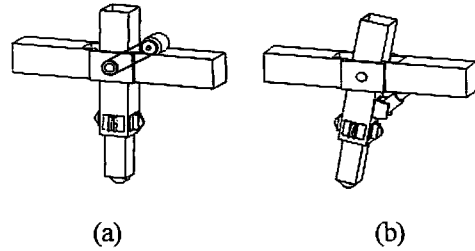


図23 脚振り機構の例

9. 結論

以下に現時点で得られた結果を示す。

1. バネ圧縮時にモータに流す電流の計算式を導出した。
2. 久保の作成した3次元走行用のシミュレーションモデルを改良し、8の字走行に成功した。
3. 久保の製作した脚部機構を使用して動作実験を行い、着地中のバネの解放ができないことを明らかにした。
4. バネ解放機構を提案し、実際に製作して動作させ、連続跳躍に成功した。
5. 走行することを考慮した脚部を設計、製作し、跳躍回数を増やすことができた。

今後の課題として、跳躍高度補償プログラムの実装、脚振り機構の設計・製作、ボディの設計などが挙げられる。

謝 辞

本研究の推進に際し、ご指導、ご助力頂きました電子制御工学科服部正行教授、同、熊谷和志助教授に深謝申し上げます。また、部品を製作するにあたり、さまざまなご協力を賜りました本校技術職員、山内誠氏、駆動回路の製作に協力していただいた電子システム工学専攻2年の高橋大樹君、その他ご尽力下さった関係各位に拝謝いたします。

参考文献・URL

- [1] Marc H. Raibert, Legged Robots that Balance, MIT Press, 1986
- [2] 玄, 阿部, 江村, "膝を有する2脚走行ロボットKenkenIIの開発", 第21回日本ロボット学会学術講演会, CD-ROM, 2003.
- [3] H. Rad, P. Gregorio and M. Buehler, Design, Modeling and Control of a Hopping Robot, IEEE/RSJ Conf. Intelligent Systems and Robots, p. 1778-1785, Yokohama, Japan, July 1993
- [4] <http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/robots.html>
- [5] <http://www.cim.mcgill.ca/~artweb/monopod1/monopod1.htm>
- [6] 久保 敬, 堀籠 文太郎, 大泉 哲哉, 熊谷 和志: 自立型脚式走行ロボットに関する研究—制御則ならびに実現のための2, 3の検討—, 仙台電波工業高等専門学校 研究紀要No.33, p47-52, (2003)
- [7] Garth Zeglin, The Bow leg Hopping Robot, CMU-RI-TR-99-33, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, October, 1999