火薬の爆発特性を利用したシリンダ形跳躍ユニット*

平田 大貴^{*1}, 山田 泰之^{*2}, 大室 健^{*3}, 森田 寿郎^{*4}

Cylinder Shaped Jumping Unit Using Explosion-Characteristics of Gunpowder

Daiki HIRATA^{*1}, Yasuyuki YAMADA,
Takeshi OMURO and Toshio MORITA^{*1} Keio University. Department of Science and Technology
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

This paper proposes a new jumping unit that using chemical energy. Conventional jumping robots have difficulties to equip both lightweight and high output energy at the same time. In regard to this, chemical energy of black powder was adopted. Using explosives allows jumping robots to get high energy instantaneously. First of all, acceleration and velocity characteristics of the cylinder were clarified by experimental cylinder. The approximate expression of pressure change in the cylinder was derived based on the characteristics. Second, expressions of jumping theory were lead and relationships between some parameters (mass, rod-area, cylinder stroke) and jumping height were simulated. Curves with a peak were given from all of those parameters and existence of optimal value was clarified. The significance of the simulation was shown by jumping motion of about 2000mm by the experiment. Finally, four-legged robot dummy with jumping unit that change direction, control of height and isolated ignition were available, is developed. Trajectory of jumping motion was examined when the direction of cylinder was changed from vertical condition. Effectiveness of proposed method was confirmed from jumping height of 720mm with cylinder angle of 10 degree.

Key Words : Chemical Reaction, Linear Actuator, Jumping Robot, Embedded System, Explosion

1. 緒 言

1・1 背景

人間の代わりに崩壊物などの散在した不整地を踏破するロボットが期待され、多数の不整地移動ロボットが開発されている^{(1)~(4)}。それらの中でも歩行型は非常に高い対地適応性を有し、特に四足歩行ロボットは高い対地適応性と不整地移動性を有していると言われている⁽⁵⁾。しかし、ロボット本体に比べて大きい物が散在している環境では、前述の移動形態での踏破が困難な場合がある。自然界の生物はそのような障害物を踏破する手段の一つとして跳躍を行う。これにならいロボティクスの分野でもロボット自身のサイズを越える障害物を踏破するものとして、跳躍ロボットが存在する。跳躍ロボットには走行を実現するためなど安定な跳躍を繰り返すことを目的とした Hopping Robot と 1 回の跳躍高さを高めることに重点を置く Jumping Robot に分かれる。前述の目的を達成するものは後者であり、本稿では Jumping Robot の意で跳躍ロボットという言葉を利用することとする。

現在の跳躍ロボットの推進力発生方法は大きく 2 つに分けられる。一つは、圧縮空気を用いるもので、太田ら

* 原稿受付 2011 年 9 月 29 日

^{*1} 学生員, 慶應義塾大学大学院理工学研究科 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)^{*2} 正員, 慶應義塾大学大学院理工学研究科^{*3} 正員, (株)モリタホールディングス^{*4} 正員, 慶應義塾大学理工学部

E-mail: d-a.9-2@a5.keio.jp

⁶⁾が開発した「Air hopper」が代表的である。外部の大きな動力源により瞬時に大エネルギーを発揮できる。塚越ら⁶⁾はドライアイスによる空気の圧縮を使用した小型のアクチュエータにより動力源の搭載を可能とし、これを利用したロボットの開発を進めている。

もう一つは、金属の変形エネルギーにより高出力を発揮するものである。大久保ら⁷⁾は脚にとりつけられたばね要素を利用して数回のジャンプを繰り返えし、最終的に高所へ到達する方法を提案している。この跳躍方法は目標高さまでの跳躍の準備に時間を要するが、動力源を小さくできる。杉山ら⁸⁾はばね鋼などの柔軟な外郭をもつ円形ロボットを形状記憶合金アクチュエータにより変形し、曲げひずみエネルギーを利用した跳躍を実現している。このロボットは跳躍に外郭の変形を利用しており、跳躍準備時間が長いものの大型の装置なしで瞬時に大きなエネルギーを発揮できる。

前述した既存のロボットの跳躍方法の利点、欠点を表1に整理した。跳躍のタイプごとに体積、質量、跳躍準備時間、出力の4つの項目を、体積は小さい、時間は短い、質量は軽い、出力は大きい方がよいとして評価した。軽量・小型であるということと、動力源を搭載し高出力を発揮するということは相反する。従って、従来手法によりこれらの相反する機能を同時に満たす事は難しいと考えられる。また、全般的に既存の跳躍ロボットは跳躍に特化しているために跳躍部分とロボット本体が一体化しており、跳躍機能を他のロボットに応用することが難しい。

以上より、動力源を含むシステムを小型化しロボット本体に実装できること、エネルギーを瞬時に取り出せることの両立を実現する手法が望まれる。

1・2 目的

少量でも瞬間的に高出力を発生できるものとして火薬の爆発エネルギーがあるが、ロボットのアクチュエータ技術と全く異なる発想のためか、跳躍に利用した例はほとんど報告されていない。しかし、動力源として火薬の爆発を採用することで小型、瞬間的な大出力を両立したアクチュエーションをユニット単位で実現できれば、様々な小型不整地ロボットに緊急用の跳躍機能を付加することが期待できる。

そこで本研究では、様々な小型ロボットに跳躍機能を付加するための、火薬の爆発をシリンダの駆動に利用した跳躍ユニットの基礎機能を確認し、跳躍のための新たなアクチュエーション方式と成りえることを示す。

2. 設計方針

跳躍ユニットを設計するにあたり、表2に示した1)高エネルギーを発生できること、2)動力源を搭載すること、3)軽量であること、4)小型であること、5)跳躍方向の調節ができること、6)跳躍の準備時間が短いこと、7)跳躍高さの調節ができることの7つの機能が要求されると考えられる。なお、本研究では基礎機能の確認を目的としているため実用段階で必要になると考えられる連続跳躍などの機能については検討しない。

Table 1 Disposition of Each Robot

Type of Jump	Volume	Mass	Charge time	Output energy
Pneumatic	Pneumatic only × 1800*1120*530mm	× 40 k g (without power source)	○	◎ (jump height:680mm)
	Dry ice+Pneumatic ○ 230*230*230mm	○ 2 k g (with power source)	△	○ (jump height:800mm)
Deformation of metal	Spring ○ 185mm (height)	○ 0.45kg (with power source)	× 1.2-1.3s	△ (jump height:40mm)
	SMA Actuator ◎ 100mm (height)	○ 0.005kg (without power source)	× 36s	× (jump height:180mm)
× △ ○ ◎ × △ ○ ◎ × △ ○ ◎ × △ ○ ◎ Volume : big ⇔ small Charge time : long ⇔ short Mass : heavy ⇔ light Output energy : large ⇔ small				

Table 2 Design requirement

no.	Ability
1	produce high energy
2	acutuation unit should be embeded
3	be light
4	be small
5	be able to adjust angle
6	preparing time for jumping should be short
7	be able to adjust jumping hight

要求1の評価方法として既存のロボットが出せる最高跳躍高さの値を利用することとした。既存の跳躍ロボットを調査し1.5kg-2.0kg級の跳躍ロボットがこれまでなし得なかった、800mm越えの跳躍の実現を目標とした。

以上より、図1のようなユニットを含む高さ200mm総質量1.5kg程度のロボットを最大高さ800mm以上を経由して700mm(JIS規格によるデスク高さ)の障害物への到達させる跳躍能力を最低限持つことを設計目標とした。また、使用する火薬は入手が容易であることから爆竹に含まれる約0.01gの黒色火薬とした。パッケージに明記されていない1本ごとの火薬量のばらつきについてはメーカーから情報を開示してもらうことはできなかったが、法律の制約から非常に小さいことが予測できる。なお、爆発による力を効率的に圧力に変換するためには密閉空間を作る必要があるため、密閉が容易な円筒形シリンダを採用した。設計手順は次のようにした。

- 爆発式跳躍シリンダの跳躍を定式化する
- 爆発のエネルギーを効率的に跳躍のエネルギーに変換するためのシリンダ質量、受圧面積を決定する
- 設計条件を満たす上記シリンダを含んだユニットの作成と能力の検証を行う

a)により跳躍高さとし、それに影響を与えるパラメータを関連付けることができ、b)のシリンダ質量、受圧面積を計算できる。c)では跳躍方向の選択が可能であること、動力部を搭載できること、跳躍高さの調整ができることについて検証する。

3. 跳躍高さとシリンダ内爆発特性

3・1 シリンダの跳躍基礎式

跳躍高さを最大とするシリンダを選択するための跳躍高さ、シリンダ質量、受圧面積、火薬の力の関係を導式した。

銃の弾道を計算する理論として弾道学⁹⁾がある。これは銃身は固定されているものとしてとらえ、それらと比較して質量の軽い弾を飛ばすことを目的とするものであり、両者は分離することが前提である。また、想定している運動速度域は音速域以上である。一方今回取り扱う跳躍ロボットでは銃において銃身に当たる部分がロボット本体に、弾にあたる部分がロッドに相当する。本体とロッドは分離しないことが要求され、想定している運動速度は音速域でない。このような違いから弾道学を利用するのではなく、塚越ら⁶⁾にならい、シリンダの跳躍過程を図2のように(i)シリンダがピストンにぶつかるまで、(ii)シリンダがロッドに衝突する瞬間、(iii)衝突後から最高点に達するまで、の3つの過程に分けた。図や式中使用した文字は表3にまとめた。摩擦力はロッド半径に比例するとし、比例定数を a とした。座標はロッドから見たシリンダの相対位置を x 、地面からの位置を X と設定した。さらに空気抵抗、摩擦抵抗を含めた以下の条件でシリンダパラメータに対する跳躍高さを導式した。

$$\frac{dx}{dt} = v, \quad \frac{dX}{dt} = V, \quad f = a\pi d, \quad F_i = \frac{1}{2}\rho_{air}C_D S \dot{x}^2, \quad F_{iii} = \frac{1}{2}\rho_{air}C_D S \dot{X}^2$$

(i)の過程での運動方程式をロッドの受圧 p について解くと式(1)となる。

Fig. 1 Jumping image

Fig. 2 Process of Cylinder Jumping

Table 3 Parameters

$\bar{F}_i$	Average air resistance during (i)	[N]	m_2	Mass of Rod-part	[kg]
$\bar{F}_{iii}$	Average air resistance during (iii)	[N]	g	Gravitational Acceleration	[m/s ²]
d	Diameter of the rod	[mm]	v_1	Velocity at the end of (i)	[m/s]
D	Diameter of the Cylinder	[mm]	V_1	Velocity of system after collision	[m/s]
A	Cross Area of the Rod	[mm ²]	ρ_{rod}	Density of rod	[kg/m ³]
S	Cross Area of the Cylinder	[mm ²]	ρ_{air}	Density of air	[kg/m ³]
p	Inner gage pressure of Cylinder	[MPa]	L	Cylinder stroke	[mm]
$\bar{p}$	Average gage pressure	[MPa]	a	Proportional constant of friction	[N/mm]
h	Jumping Height	[m]	f	Friction	[N]
m_1	Mass of Cylinder-part	[kg]	C_D	Drag coefficient	

$$p = \frac{m_1(\ddot{x} + g) + \frac{1}{2}\rho_{air}C_D S \dot{x}^2 + f}{A} \quad (1)$$

シリンダの加速度 $\ddot{x}$ および速度 $\dot{x}$ の項が式中含まれていることより受圧 p は時間に依存する関数であることが分かる．ここで、式の簡単化のため加速中は平均圧力がかかっているとした．(i)の過程において、空気抵抗、摩擦抵抗を考慮しエネルギー原理を適用した．なお空気抵抗の値も同様に常に平均の値がかかっているとした．

$$m_1 g L + \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = A \bar{p} L - f L - \bar{F}_i L \quad (2)$$

(ii)の過程では衝突は微小時間であり、重力の影響を無視でき運動量は保存されるとした．

$$(m_1 + m_2) V_1 = m_1 v_1 \quad (3)$$

(iii)の過程で空気抵抗を考慮してエネルギーの収支を考慮すると式(4)となる．

$$(m_1 + m_2) g h = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) V_1^2 - \bar{F}_{iii} L \quad (4)$$

式(2)～(4)より、跳躍高さ h と受圧面積 A 、シリンダ質量 m_1 、 m_2 、火薬の力 $\bar{p}$ の関係式(5)を得た．ただし、 $\bar{p}$ はシリンダの圧力特性の定式化が困難であるため、関係式(5) の $\bar{p}$ においても実験により求めることとする．

$$h = \frac{L m_1}{g(m_1 + m_2)^2} (A \bar{p} - m_1 g - f - \bar{F}_i) - \frac{\bar{F}_{iii} L}{(m_1 + m_2) g} \quad (5)$$

3・2 実験による圧力特性の測定

式(5)より h の値を求めるためにはシリンダの形状により決定する 5 つの値 L 、 m_1 、 m_2 、 A 、 f のほかに $\bar{p}$ 、 $\bar{F}_i$ 、 $\bar{F}_{iii}$ の 3 つの値が必要である．これらを構成する共通の引数は式(1)などから分かるように $\dot{x}$ 、 $\ddot{x}$ の値であり、跳躍高さを計算するためにはシリンダの速度と加速度を求めなければならない．そこで試作機 M1 を作成し実験を行い必要な値を求めた．シリンダの圧力特性を式(1)を用いて実験的に求めるために、図 3 に示した試作機 M1 を開発した．装置は錘を 5 つまで搭載できる．使用する火薬は爆竹に含まれる黒色火薬とし、シリンダ内に爆竹を 1 本搭載できるようにした．爆圧の漏れを防ぐために、点火プラグを直接シリンダに接続し、ロッド先端近くに溝を設けて O リングをはめた．ワイヤによりシリンダ部とピストン部の追従を行う．

この試作機 M1 を用いて加速度、速度測定実験を行った．図 4 に実験装置の概観を示す．高速度撮影を考慮し、

標点として LED をとりつけた．点火プラグと試作機 M1 をリード線で接続し，3A，4V の電流を供給し，シリンダ部，ロッド部の標点(LED)より，跳躍の様子を 1200fps で撮影した．画像解析の結果より得た速度，加速度の値を式(1)に代入し p を求めた．さらに，そのデータを画像解析時に得た時間に対する位置データを利用してストロークと圧力の関係で表した．これは，もっとも近い先行研究であると考えられる弾道学における知見との比較により測定結果の妥当性を確認するためである．弾道学には弾が砲身内を運動している範囲を扱う砲内弾道学と弾が砲身から飛び出した後の範囲を扱う砲外弾道学があるが，比較の対象は跳躍ロボットと銃で大きな差は生じないと考えられる砲内弾道学における銃身内の弾の位置と圧力の関係を示したものの⁽¹⁰⁾とした．図 5 に圧力ピーク付近を 2 次曲線，それ以降は火薬が化学変化後の断熱過程と仮定して求めた近似曲線(式(6))を示す．図 5 を弾道学の知見と照らし合わせたところ，初めに圧力のピークを迎え，その後は徐々に圧力が低下する砲内圧力の特徴と定性的に一致することが確認できた．

以上より圧力特性が判明したため，以降は図 5 を用いて平均圧力 $\bar{p}$ の値を定める．

$$\begin{aligned} p &= -0.1256x^2 + 0.601x + 15.684 & x \leq 7.6 \text{ [mm]} \\ p &= \frac{62}{x^{0.767}} & x > 7.6 \text{ [mm]} \end{aligned} \quad (6)$$

4. 跳躍高さを高めるシリンダの設計

4・1 跳躍高さとシリンダ構成パラメータの関係

図 5 の圧力特性を用いて，シリンダ質量および受圧面積が跳躍高さに与える影響を式(5)より計算し，跳躍ユニット設計において最適なシリンダ質量，受圧面積を決定する．

シリンダのみに注目した 2 章の理論式を元にシリンダに関連するパラメータである質量 m ，ストローク L ，受圧面積 A と跳躍高さ h の関係について計算を行った．摩擦抵抗の比例定数 a の値は，試作機 M1 の片側を固定しもう一方をばねはかりで水平に引っ張る試行を 10 回行った結果より 0.476 とした．また，空気圧係数 C_D の値はシリンダ形状が円筒であるため文献⁽¹¹⁾より 1.1 とした．その他の値は表 4 に示した．

Fig.3 Overview of M1

Fig.4 Overview of $\ddot{x}$, $\dot{x}$ - Experiment

Fig.5 Relation between stroke and pressure

Table 4 Basic Specification of Cylinder for simulation

L	95 mm	D	10 mm
d	5 mm	A	19.6 mm ²
f	7.47 N	g	9.8 m/s ²
S	78.5 mm ²	ρ_{rod}	7.38×10 ³ kg/m ³
m_1	512 g	$\bar{p}$	5.2 Mpa
m_2	47 g	ρ_{base}	1.2 kg/m ³
$\bar{F}_i$	7.9×10 ⁻⁴ N	$\bar{F}_{iii}$	2.2×10 ⁻¹⁰ N

A) 質量と跳躍高さ まず、質量について計算を行った。シリンダ部質量 m_1 とピストン部質量 m_2 との比をとり、質量比 μ とした。この質量比と跳躍高さについて計算したところ図 6 のようになり、 m_1 に対し m_2 が 10% 以上であれば最大跳躍高さと同様の跳躍高さが得られることがわかった。以上より、必要以上の軽量化は跳躍高さ向上に寄与が少ないことを考慮し設計を行うべきであることがわかった。

B) 受圧面積 A と跳躍高さ A を変化させるとそれにともないロッド直径も変化する。また、摩擦抵抗の変化、ロッド部質量の変化、内圧の変化、空気抵抗の変化も生じると考えられる。これらを関連付けるために制約条件を $D=2d$ 、シリンダ内の体積を 1865mm^3 で一定、とした。爆竹の断面積 12.6mm^2 を最小値として、直径 d を 4mm から 0.1mm 間隔で 50mm (受圧面積 A は約 1960mm^2) まで変化させ MATLAB で計算を行った。結果、図 7 に示すように $A=80\text{mm}^2$ でピークを持つ曲線が得られた。これよりロッド直径 d の値が $4\sim 25\text{mm}$ の範囲で選択することが有効であると考えられる。

4・2 第一跳躍実験

計算結果の有意性を確認するため、錘を 4 つ乗せた試作機 M1 (総質量 0.426kg) を用いて跳躍実験を行った。最高点に達するまでの時間を 100% とした場合の各時間での跳躍の様子を図 8 に示した。予測される跳躍高さ 1950mm 付近に、 100mm 毎にテープを張った全長約 500mm の測定尺を設置した。点火方法は加速度、速度測定実験と同様である。結果、 2060mm の跳躍に成功した。計算値との誤差は 5% ほどであり、およそ予測どおりの結果となった。なお、複数回において同程度の高さへの跳躍が確認できたため 1 本ごとの火薬量のばらつきは少なく跳躍高さへの影響は小さいといえる。以上より、開発する跳躍ユニットに搭載するシリンダの質量、受圧面積を決定できた。

5. 跳躍ユニットの開発および検証

5・1 概要

4 章まではシリンダのみに注目したが、実際にロボットに実装するためのユニットにするためには新たな設計要求が生じる。そこで、ロボットへの取り付け装置、簡易的に四足ロボットを模したダミーを作成し、実験によりユニットとしての能力の検証を行った。

Fig. 6 Relation between μ and h

Fig. 7 Relation between A and h

Fig.8 Overview of Jumping

5・2 跳躍高さの調節

跳躍高さの調節のために、シリンダストローク L および火薬量に着目し、跳躍高さとの関係を調べた。まず、火薬量の変化による跳躍高さへの影響を調べた。弾道学の知見よりシリンダの初速は火薬量の平方根に比例するため、火薬量と跳躍高さは比例すると予測される。爆竹 2 本をシリンダ内に挿入した場合と、爆竹 2 本分の薬室体積に爆竹 1 本を入れた場合で実験を行った。実験の結果、跳躍高さは爆竹 2 本で約 680mm、1 本で約 300mm であり、2 倍以上の差が生じた。エネルギーロスを抑えた適切な薬室体積を選択することが精度向上のために必要であり、火薬量の変化による跳躍高さの調節は困難であると考えられる。

跳躍高さへ影響を与えるもう一つのパラメータとしてシリンダストロークがあげられる。そこで表 4 の数値を用いて、式(5)よりストローク L と跳躍高さ h の関係を計算した。なお、ロッドの長さをストローク長 L の 1.1 倍とし、台質量 m_b を含んだロッド部質量 m_2 が最軽量となるよう式(7)を設定した。また、 L の変化に伴いシリンダが爆圧を受ける距離(時間)も変化し、供給される総エネルギー量に変化が出ると考えられる。平均圧力の変化には図 5 に示した近似曲線を用い式(8)で対応した。

$$m_2 = \rho A(1.1L) + m_b \quad (7)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{L} \int_0^L p(x) dx \quad (8)$$

図 9 より、ストローク長 L が 0～50mm の範囲で跳躍高さ h の値が 0～1260mm と大きく変化していることがわかる。よって、この範囲でストローク長を変化させることで跳躍高さの調節ができると考えた。

5・3 跳躍方向調節装置

跳躍ユニットに必要な機能として、跳躍以外の行動をシリンダが邪魔しないように高さ調節が可能であることと跳躍方向を調節できることがあげられる。そこで、図 10 に示したシリンダ高さ、角度を 2 つのターンバックルにより調整できる跳躍方向調節装置を作成した。角度調節用ターンバックルによりシリンダ角度が 0～30° まで調節できる。角度の変化に伴い接地面が地面から浮いてしまうが、高さ調節用ターンバックルにより、調節範囲内の角度では地面に接することができる。装置の総質量は 445 g、装置高さは 130 mm であり軽量小型であるといえる。また、跳躍時の姿勢変化を防ぐために回転中心をシリンダ上方に設定し、角度の設定によらず発揮力のベクトルが常に重心を向くことで重心まわりの回転モーメントの発生を抑えるようになっている。

装置の機能を検証するため、図 11 に示すように装置を四足ダミーに取り付けた試作機 M2 を用い図 12 に示した跳躍実験を行った。総質量を 1.5kg、シリンダ角度を 10° に設定し実験した結果、水平姿勢状態を保ったまま跳躍高さ 720mm、跳躍距離 740mm の跳躍を実現した。

5・4 動力部の搭載

ユニットはロボットが広範囲を自由に移動できるように、コードなどによる外部との接触なしに本体に搭載で

Fig.9 Relation between L and h

Fig. 10 Jumping unit

きることが求められる。そのような状況下では爆竹への点火操作を人間が直接行うことはできないため、図 13 に示した、一定時間経過後に自動的にスイッチが入るタイマ回路を作成した。使用した部品のスペックは表 5 に示してある。さらに、タイマ回路に点火プラグ用の大電流を出力できる 1300mAh のニカド電池と専用コードを接続し、図 14(a)に示した携帯式点火装置を作成した。なお、図 14(b)にタイマ回路を含めた回路図を記載した。

爆竹への着火試験を行ったところ、スイッチを入れてから約 10 秒後の着火が確認できた。これにより動力部の搭載が実現できた。

5・5 跳躍ユニット

前節までの結果を踏まえて、跳躍方向の調節が可能な動力部を搭載した跳躍ユニットを作成した。ユニットをダミーに取り付けた試作機 M2 は有線での接続が無く、外部からの供給無しに跳躍を実現できる。試作機 M2 の総質量を 1.5 kg に設定し、700mm の高さの机に跳躍させる実験を図 15 に示した環境で行うことで要求機能を確認した。目標地点へ到達するまでの時間を 100%とした場合の各時間での跳躍の様子を図 16 に示した。携帯式点火装置による点火により水平状態の姿勢を保ったまま総質量 1.5kg の試作機を斜方向へ跳躍させ、およそ 1.3m の最高跳躍高さを經由して目標の机への到達に成功した。この結果によってユニットに要求される基礎機能が実現できた。

さらに、現在開発されている跳躍ロボットと今回開発したユニットが出せる最高跳躍高さを比較し図 17 に示した。既存のロボットの跳躍高さは青点で示し、赤点で今回開発したユニットの跳躍高さを示した。以上より、既存の小型ロボットに比べ高い跳躍を実現できることが判明した。

Fig.11 Overview of M2

Fig.12 Overview of Experiment

Fig.13 Timer circuit

Table5 Spec of electronic parts

Symbol	Parts	Capacity
Tr1,2	Transistor	2SC1815
R1,2	Resistance	4.7k Ω (1/4W)
R3	Resistance	10 Ω (1/4W)
VR	Variable resistance	100k Ω (16 ϕ ・B)
C	Electrolytic capasitor	2200 μ F (16WV)
RL	Relay	G5V2
SW1	toggle switch	
SW2	toggle switch (3 contact points)

(a)Overview of device

(b)Circuit diagram

Fig.14 Portable ignition device

Fig.15 Overview of experiment

Fig.16 Overview of Jumping

Fig. 17 Comparison of jumping ability

6. 結 言

本研究では、小型、瞬間的な大出力を両立できる跳躍ユニットの開発のために火薬のシリンダ内爆発の利用を試みた。2種類の実験装置を開発してシリンダの圧力特性やユニット化に必要な能力を検証した結果、その過程において次の成果を得た。

- ・ シリンダ型試作機 M1 により爆発シリンダの圧力特性を明らかにした.
- ・ シリンダ質量, ロッド断面積が跳躍高さに与える影響を調べ, 跳躍高さの計算結果と誤差 5%以内となる高さ約 2m を試作機 M1 の跳躍実験により実現した.
- ・ 跳躍方向調節装置および携帯式点火装置を作成し, 跳躍機能をユニット単位にまとめることに成功した.
- ・ 火薬量よりも, ストローク長による跳躍高さの調節が有効であることを示した.
- ・ 4 足の試作機 M2(総質量 1.5kg)により約 1.3m(設計目標 0.8m 以上)の跳躍を実現できた.

以上より, 火薬による瞬間的な高出力, 跳躍方向の選択, 遠隔操作, 跳躍高さが調節可能である小型ロボットののための跳躍ユニットを開発できた.

実用化に向けた今後の課題として, 跳躍回数の増加や火薬の性質への配慮等があげられる. 跳躍回数の増加に関しては今回のシリンダを複数持つユニットに改良することを考えている. また, 黒色火薬の湿気に弱い特性などを考慮すると, シリンダの密閉度合いを向上させる工夫も必要であるといえる.

文 献

- (1) Stoeter S., Rybski P., Gini M., Papanikolopoulos N., “Autonomous Stair-Hopping with Scout Robots”, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and systems*, Vol.1, (2002), pp. 721-726.
- (2) 衣笠哲也, 大谷勇太, 土師貴史, 吉田浩治, 大須賀公一, 天野久徳, “柔軟全周囲クローラ(FMT): 無限軌道と脊椎構造を用いた新しい移動機構”, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.1 (2009), pp.107-114.
- (3) 亀川哲志, 松野文俊, “遠隔操作性を考慮した双頭ヘビ型レスキューロボット KOHGA の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.7 (2007), pp.1074-1081.
- (4) Krishna M., Bares J., Mutschler E., “Tethering System Design for Dante II”, *Proceedings of the IEEE International Conference on robotics and Automation*, Vol.2 (1997), pp.1100-1105.
- (5) 太田祐介, 菊池文孝, 広瀬茂男, 米田完, “空気圧シリンダを利用した跳躍型 4 足歩行ロボット「Air Hopper」の開発”, 設計工学会, Vol.43, No.8 (2008), pp.45-54.
- (6) 塚越秀行, 北川能, “空圧ジャンピングの跳躍高度を高める設計”, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 39, No. 6 (2008), pp. 332-336.
- (7) 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”, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.5 (1998), pp.633-639.
- (8) 杉山勇太, 平井慎一, “柔軟ロボットの変形を用いた移動と跳躍”, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.3 (2006), pp.378-387.
- (9) 村田勉, “発射薬の設計理論”, 工業火薬協会誌, Vol.16, No.4 (1955), pp.199-213.
- (10) 社団法人火薬学会編, “エネルギー物質ハンドブック”, 共立出版 (1999).
- (11) White F., “Fluid Mechanics Sixth Edition”, *Mc Graw Hill Higher Education* (2006).