物体投擲のためのねじりばねの直列構造に基づく 瞬発力発生装置

市川 泰久^{*1} 望山 洋^{*1} 藤本 英雄^{*2}

Impulse Force Generator Based on a Serial Chain of Torsion Springs for Catapulting an Object

Yasuhisa Ichikawa^{*1}, Hiromi Mochiyama^{*1} and Hideo Fujimoto^{*2}

In this paper, we propose an impulse force generator for catapulting an object. The proposed impulse force generator utilizes snap-through buckling of an elastic body. The distinguished feature of the device is to adopt a serial chain of torsion springs with both high elasticity and flexibility as its elastic body. The use of the serial chain of torsion springs enables us to increase the energy density of the elastic body. Experimental results show that the proposed compact and lightweight impulse force generator has high capability of catapulting an object. The generated maximum momentum is of 16 [Ns] in spite that the maximum driving torque necessary for snap-through buckling is only of 21 [Nm].

Key Words: Flexible Robot, Impulse Force, Snap-through Buckling, Catapult

1. はじめに

物体投擲^{とうてき}は、物体を離れたある地点に到達させるための手段であり、100 [g] 以下の比較的軽量の物体を、20 [m] 以上の比較的遠くの地点に到達させる際に用いられることが多い。軽量の物体を精度よく遠くに到達させることができれば、環境の適切な位置に大量にセンサやロボットを配置する必要のある、レスキューにおける探索作業などの空間知能化に用いることができる。特に高所への物体投擲が可能であれば、ビルなどの建物内の情報収集ができる。また、重量物を投擲するほどの投擲能力があれば、荷積みの作業支援などに利用可能である。このように高出力の物体投擲装置の開発によって、これまでに実現できなかったロボティクスにおける新たな応用展開が拓けると期待される。

物体を高所あるいは遠くまで投擲するためには、大きな初速度を与える必要があるが、そのための必須要素は、瞬発力を発生する装置である。ヒトは全身の筋肉を利用して瞬発力を生成し、物体を投擲する。しかし、生物の筋肉と比べて、現在のロボットアクチュエータの瞬発力発生能力は、それほど高いとは言えない。このため、高い投擲能力を有するロボットは実現さ

Table 1 Method for throwing

Category	Method	m [kg]	v [m/s]	p [Ns]
Tool	Crossbow	0.018	73	1.3
Tool	Bow	0.030	50	1.5
Tool	Golf club	0.046	69	3.2
Device	Pitching machine	0.149	46	6.9
Robot	Throwing robot [†]	—	11	—
Robot	Casting manipulator	0.100	3.2	0.3
Robot	Jumping robot (MB Cylinder)	0.06	11.3	0.7
		0.40	8.3	3.3

れていない。小型・軽量な高い瞬発力発生能力を有する装置が実現されることで、可搬性の高い物体投擲装置への応用、さらには高出力なロボットアクチュエータとしての利用が期待できる。本研究の目的は、可搬性を有するほど小型・軽量でありながら、物体投擲に利用できる高出力の瞬発力発生装置の開発である。

これまでに、物体を投擲する様々なツールや装置が考案されている。Table 1 は、各ツールや装置における投擲物体の質量 m [kg]、速度 v [m/s]、運動量 p [Ns] を比較した表である。クロスボウ (Crossbow) や和弓 (Japanese bow) は、ヒトが弓に蓄積した弾性エネルギーを利用し、投擲物体のボルトあるいは矢に対して大きな初速度を与えることができるツールである。しかし、クロスボウや和弓では、軽量な棒状の物体を投擲する

原稿受付 2010 年 1 月 12 日

^{*1}筑波大学

^{*2}名古屋工業大学

^{*1}University of Tsukuba

^{*2}Nagoya Institute of Technology

■ 本論文は学術性で評価されました。

[†]ウレタンボールを投擲しているが、質量は明記されていない。それほど重いものではないと推察される。

Fig. 1 A serial chain of torsion springs

Fig. 2 A serial chain of torsion springs in flexion

ことしかできず、投擲対象に限られる。また、クロスボウのセッティングには大きな力を必要とすること、弓の扱いに熟練を要することなどの問題がある。ゴルフクラブの打撃による投擲[†]では、ヒトのスイングによって物体を打撃し、物体に対して大きな初速度を与え、投擲を行う。しかし、この投擲では、投擲精度がよくないこと、投擲物体は軽量物に限られること、使用に熟練を要することなどの問題がある。装置による物体投擲の代表例として、野球のピッチングマシンが挙げられる。この装置は、ローラーの回転力による挟み込みにより、物体を投擲する。物体に対し、大きな初速度を与えることができ、投擲の精度も高い。この装置の問題点は、投擲物体が軽量物に限られること、装置の小型・軽量化が困難であり、可搬性の確保が難しいことである。

一方で、ロボットによる物体投擲が試みられている。Senooらは、投球を行うスローイングロボットを開発している[1]。このロボットは、高速マニピュレータを用い、ボールの投擲を行う。しかし、マニピュレータを用いるため、ロボットシステム全体の大型化を招くこと、強度の面から投擲対象が軽量物に限られることなどの問題がある。また、Arisumiらは、グリップ自体を投擲するキャスティングマニピュレーションロボットを開発し、遠方へのマニピュレーションを試みている[2]。このロボットによっても、投擲されるグリップで物体を把持することにより、間接的に物体投擲が可能であるが、マニピュレータを揺り動かして投擲を行うため、強度面から投擲物体が軽量物に限られ、また、物体に対して大きな初速度を与えられない。現時点で最も有力な投擲ロボットは、Watariらが提案しているMB Cylinderを用いたロボットである[3]。MB Cylinderは、

[†]本稿では、「投擲」という語を拡大使用して、打撃によって物体を速くに至らしめることも「投擲」に含める。特にこの場合は「打撃による投擲」と呼ぶ。

Fig. 3 Shape transition of the impulse force generator

永久磁石と圧縮空気を利用した瞬発力発生装置であり、比較的小型・軽量でありながら、大きな瞬発力を発生できる。しかし、MB Cylinderでは、特殊なポンプを必要とする。

また、このほかに、空気圧シリンダ、燃焼、コイルばね、帯状弾性体などを利用した瞬発力発生装置も開発されている[4]～[8]。しかし、これらの装置では、大型化・重量化を招くこと、本質的な制御性・安全性に問題があること、高出力化が困難であることなどの欠点が存在する。

そこで、本研究では、ねじりばねの直列構造(Fig. 1, Fig. 2)に基づく瞬発力発生装置(Fig. 3)を提案する。提案する装置では、弾性体の飛び移り座屈を利用する。提案する装置の最も顕著な特徴は、装置の弾性体として、高弾性と可撓性を兼ね備えた、ねじりばねの直列構造を採り入れている点である。このねじりばねの直列構造により、可撓性を損なうことなく構造の厚さ方向に弾性要素を配置できるため、弾性体に蓄積できる弾性エネルギーの高密度化が可能となる。この結果、提案する装置では、比較的小型・軽量でありながら、大きな瞬発力を発生させることができる。提案する装置は、様々な物体を投擲することができるため、汎用性の高い投擲ツールを実現している。また、この装置では、ヒトからエネルギーを取り出すことで、受動駆動することが可能である。

以下、まず2章において、提案する瞬発力発生装置の弾性体となる、ねじりばねの直列構造について説明する。3章において、提案する瞬発力発生装置が高い投擲能力を有することを明らかにする。最後に4章で、本論文で得られた結果をまとめる。

2. ねじりばねの直列構造

本章では、筆者らが提案している、弾性体の飛び移り座屈を利用した瞬発力発生装置の高出力化における問題点を述べた上で、提案する瞬発力発生装置の弾性体となる、ねじりばねの直列構造について説明する。その後、ねじりばねの直列構造の有効性を検証するために行った実験について述べる。

2.1 高出力化における問題点

筆者らがこれまでに提案している瞬発力発生装置[9]は、帯状の弾性体とその両端に固定された二つの回転関節からなる簡易な構造をもつ。この装置の回転関節に適切なトルクを印加す

Fig. 4 A prototype of the impulse force generator proposed by the authors previously

Fig. 5 A serial chain of torsion springs which are vertical elastic plates in a line arranged horizontally

ることで、飛び移り座屈を生じさせ、瞬発力を発生させることができる。この装置は、コンパクトでありながら、大きな瞬発力が生成可能である。高い瞬発力発生能力が必要とされる物体投擲作業などに利用するためには、この装置の高出力化が不可欠である。これまで、連続体である帯状弾性体の形状整形や増厚化によって、装置の高出力化を試みた (Fig. 4) [10]。しかし、形状整形では、帯状弾性体の占有空間が大きくなること、また、増厚化では、帯状弾性体の可撓性が損なわれることにより、装置の大型化を招いた。高出力化における問題の本質は、弾性体の可撓性を保ったまま、弾性を高められなかったことである。

2.2 ねじりばねの直列構造による弾性エネルギー高密度化

弾性体の弾性を高めるためには、幅や厚みを増加させる必要がある。筆者らが提案している瞬発力発生装置では、弾性体の幅が装置サイズへ大きな影響を及ぼす。そのため、弾性体の増厚化により、弾性を高めなければならない。しかし、連続体である帯状弾性体では、局所的な曲げによって弾性エネルギーを蓄積するため、増厚化を施すと可撓性が損なわれる。

提案する瞬発力発生装置の弾性体となる、ねじりばねの直列構造は、複数の弾性板と剛体を交互に配置した構造を有する。Fig. 1 は、瞬発力発生装置の弾性体となるねじりばねの直列構造であり、Fig. 2 は、屈曲時のねじりばねの直列構造である。Fig. 5 は、ねじりばねの直列構造の簡易図である。このねじりばねの直列構造の弾性板は、ねじれの回転軸がねじりばねの直列構造の長手方向軸と直交するように配置されており、各弾性板がねじれることによって、直列構造全体に大きな曲げが生じる (Fig. 6)。弾性板を離散的に配置することにより、可撓性を失うことなく、ねじりばねの直列構造の厚み方向に弾性要素を配置することができる。そのため、省スペースに高い弾性エネルギーを蓄積することができる。この結果、ねじりばねの直列

Fig. 6 A zoomed figure of a serial chain of torsion springs in flexion

Fig. 7 Elastic energy and curvature

構造は、連続体の弾性体では実現困難であった、高弾性でありながら、飛び移り座屈が可能なほどの可撓性を実現することが可能になる[†]。

2.3 弾性要素の集中配分による軽量化

ここでは、連続体の帯状弾性体の飛び移り座屈直前における弾性エネルギーの蓄積の状況を考察することにより、提案する構造体におけるねじりばねの適切な配置について議論する。連続体である帯状弾性体の形状を平面曲線で近似し、弾性体の長手方向に沿った各微小要素に、局所的に弾性エネルギーが蓄積されると仮定する。このとき、弾性体全体に蓄積される弾性エネルギー E は、次式のように表記できる。

$$E = \int_0^L \frac{1}{2} k \theta^2(\sigma) d\sigma \quad (1)$$

ここで、 L は弾性体の長さ、 k は弾性体のばね係数に相当する定数、 σ は弧長パラメータ、 $\theta(\sigma)$ は弧長 σ における弾性体の形状曲線の曲率である。Fig. 7 の上図は、 $x-y$ 平面上に、飛び移り座屈直前の弾性体の形状を示した図である。ただし、関節軸間方向に x 軸をとっている。これに対し、Fig. 7 の下図は、その形状時の蓄積された弾性エネルギーを示した図である。横軸は弧長 σ 、縦軸は弾性体の長手方向に沿った各微小要素に局所的に蓄積される弾性エネルギー $1/2 k \theta^2(\sigma)$ である。上下の図の間の対応関係を明確にするために、いくつかの対応点を点線で繋いでいる。実線と横軸に囲まれた斜線領域が、弾性体全体に蓄積される弾性エネルギー E である。弾性エネルギー E は、曲率 $\theta(\sigma)$ の 2 乗に比例して増加する。このことをグラフ上で示すために、縦軸に曲率をとって破線で示してある。このグラフより、ある特定の箇所に集中してエネルギーが蓄えられていることが分かる。そこで、この点に着目して、飛び移り座屈の直前の形状において、高い弾性エネルギーが蓄積される 3

[†]なお、ねじりばねの代わりにコイルばねを使用した直列構造では、質量が大きくなり、高出力化が困難であることを別途確認している。

Fig. 8 Measurement of deflection

箇所に、ねじりばねの直列構造の弾性要素を集中的に配置する (Fig. 5)。さらに、ねじりばねの直列構造の曲率が小さい部分に、弾性板に用いているばね材に比べて軽量の剛体を配置することにより、軽量化を図る。これにより、ねじりばねの直列構造の質量当たりのエネルギー蓄積能力を高めることができる。

2.4 高弾性と可撓性の両立の検証

ねじりばねの直列構造の高弾性と可撓性の両立の検証を目的とし、たわみ計測実験および飛び移り座屈試験を行った。

Fig. 8 は、たわみ計測実験の様子である。たわみ計測実験では、弾性部材の一端を固定することで片持ちばり状態をつくり、もう一方の自由端の先端に荷重 F [N] を加えた際の先端のたわみ δ [mm] を計測した。用いた弾性部材は、1 ユニットの有するねじりばねの直列構造と厚みが異なる 3 種類の帯状弾性体の計 4 種類である。先端に加える荷重 F は約 19.6, 58.9, 98.1 [N] の三段階で変化させた。この実験に用いたねじりばねの直列構造および帯状弾性体の仕様は、Table 2 のとおりである。このねじりばねの直列構造の弾性板には、焼き入れりボン鋼 (JIS G4802 SK85-CSP H) の帯片を 2 枚重ね 1 組で用いており、剛体にはアルミニウムを用いている。帯状弾性体の材質は、弾性板と同じである。

飛び移り座屈試験では、3 ユニットの有するねじりばねの直列構造と帯状弾性体を瞬発力発生装置に取り付け、複数回飛び移り座屈を生じさせた際の座屈時の塑性変形の有無を調べた。Fig. 3 は、提案するねじりばねの直列構造に基づく瞬発力発生装置の形状遷移図である。Fig. 9 は、ねじりばねの直列構造に基づく瞬発力発生装置のプロトタイプである。この装置では、回転関節に取り付けられたペダルをヒトが踏みつけることにより、回転関節を駆動し、飛び移り座屈を生じさせる。この試験に用いたねじりばねの直列構造、帯状弾性体の仕様は Table 3 のとおりであり、瞬発力発生装置の仕様は Table 4 のとおりである。ねじりばねの直列構造の弾性板、帯状弾性体、剛体の材質、また、直列構造に用いている帯片数は、たわみ計測実験と

Table 2 Specification of a serial chain of four torsion springs and a continuous elastic strip

	A serial chain of four torsion springs	A continuous elastic strip		
Mass [kg]	0.72	0.12	0.15	0.19
Length [mm]	245			
Width [mm]	200	100		
Thickness [mm]	34	0.6	0.8	1.0
Elastic plate size [mm]	0.8 × 34 × 200	—		
Number of elastic plates	4	—		
Number of units	1	—

Fig. 9 Prototype of the impulse force generator based on a serial chain of torsion springs

Table 3 Specification of a serial chain of torsion springs and a continuous elastic strip

	A serial chain of torsion springs	A continuous elastic strip
Mass [kg]	2.3	0.45
Length [mm]	730	
Width [mm]	200	100
Thickness [mm]	34	0.8
Elastic plate size [mm]	0.8 × 34 × 200	—
Number of elastic plates	12	—
Number of units	3	—

Table 4 Specification of the Impulse force generator

Length [mm]	680
Width [mm]	280
Height [mm]	250
Distance between joint axes [mm]	530

同様である。

Fig. 10 は、たわみ計測実験の結果を示した荷重-たわみ曲線である[†]。このグラフの横軸はたわみ δ [mm]、縦軸は先端荷重 F [N] である。ねじりばねの直列構造の曲線は、厚さ 0.8 [mm] の帯状弾性体の曲線よりも左側に位置している。このことから、ねじりばねの直列構造は、厚さ 0.8 [mm]、幅 100 [mm] の帯状弾性体に比べ、高い弾性を有していることが確認できる。

Fig. 11 は、ねじりばねの直列構造を用いた飛び移り座屈試験の様子である。飛び移り座屈試験の結果、ねじりばねの直列構造では、繰り返し飛び移り座屈を生じさせても性能が低下しないことが確認できた。一方、0.8 [mm] 厚の帯状弾性体は、座屈の際に大きな塑性変形を生じ、数回の飛び移り座屈で大幅な

[†] この荷重-たわみ曲線は、実験において荷重に対してたわみが急激に変化することがないことを確認した上で、代表的な 3 点を計測し、そのプロットを滑らかな線で繋いだものであるが、もちろん、プロット点以外の曲線上の値を保証するわけではないことに注意されたい。

Fig. 10 Load-deflection curve

Fig. 11 Motion of the impulse force generator

性能低下を招くことが分かった。また、1.0 [mm] の帯状弾性体は、この座屈試験と同条件では複雑な形状での飛び移り座屈が不可能であり、大きな瞬発力が発生できない。0.6 [mm] 厚の帯状弾性体では、この座屈試験と同条件において、ねじりばねの直列構造に比べて低弾性であり、大きな瞬発力を生成できないことが分かっている。この検証により、ねじりばねの直列構造は、高弾性と可撓性を兼ね備えていることが確認できた。

2.5 必要最大駆動トルク

瞬発力発生装置の必要最大駆動トルクは、装置の基本性能の一つである。そこで、提案するねじりばねの直列構造に基づく瞬発力発生装置の無負荷時の必要最大駆動トルクを調べるために、検証実験を行った。この実験では、装置の駆動トルクが最大となる飛び移り座屈前の状態において、装置のペダルにおもりを載せ、力のつり合い状態をつくることにより、必要最大駆動トルクを求めた。ねじりばねの直列構造および瞬発力発生装置の仕様は、飛び移り座屈試験と同様である (Table 3, Table 4)。

実験の結果、提案する瞬発力発生装置の必要最大駆動トルクは、約 21 [Nm] であることが確認できた。この値は、提案する装置では、大きな駆動トルクを必要とせず、ヒトの無理のない踏みつけ荷重で、装置の駆動が可能であることを示す。また、この装置のねじりばねの直列構造に負荷が加えられた場合においても、負荷による影響は小さく、装置の必要最大駆動トルクの値はほとんど変わらないことが確認されている。

Fig. 12 Measurement of velocity and position

3. 投擲能力の検証

本章では、提案するねじりばねの直列構造に基づく瞬発力発生装置の投擲能力を検証するために行った実験について説明する。

3.1 最高速度とその地点の計測

物体の投擲高さは、投擲時の物体の初速度で定まる。ねじりばねの直列構造が最高速度を有する地点で物体を投擲することで、投擲物体に対して効率よくエネルギーを付与することができる。そこで、提案する瞬発力発生装置を用い、物体投擲の際の適切な投擲位置の検証を目的とし、飛び移り座屈を生じさせた際のねじりばねの直列構造の最高速度およびその地点の計測を行った。ねじりばねの直列構造および瞬発力発生装置の仕様は、飛び移り座屈試験と同様である (Table 3, Table 4)。

Fig. 12 は、ねじりばねの直列構造の最高速度およびその地点の計測状況の図である。この実験では、飛び移り座屈の前後で変位が最大となる、ねじりばねの直列構造の中央部ユニットの上部に光源を取り付け、暗室内で飛び移り座屈を生じさせた際の光源の軌跡を追跡することにより、中央部ユニットの上部の位置 (x_s [m], y_s [m]) および絶対速度 v_s [m/s] の時間変化を計測した。ここで、 x_s はねじりばねの直列構造の長手方向 x に対する、回転関節と中央部ユニットの上部間距離であり、 y_s は瞬発力発生装置の高さ方向 y に対する、床面と中央部ユニットの上部間距離である。光源の軌跡は、光源の動きを高速度カメラ (600 [fps]) で撮影することによって取得し、その軌跡の追跡には動画解析ソフトを使用した。

Fig. 13 は、飛び移り座屈後のねじりばねの直列構造の速度および位置の計測結果である。このグラフの横軸は計測時間、縦軸は中央部ユニットの上部の位置および絶対速度である。このグラフより、ねじりばねの直列構造の中央部ユニットの上部が、瞬発力発生装置の回転関節から直列構造の長手方向に約 0.25 [m]、床面から装置の高さ方向に約 0.47 [m] の地点に到達した際に、最高速度の 10 [m/s] に達することが確認できる。この最高速度地点は、飛び移り座屈後のねじりばねの直列構造が静止する安定形状時の地点 (約 (0.26, 0.49) [m]) よりも、少しだけ下に位置する。

3.2 最大運動量と蓄積弾性エネルギーの概算

提案する瞬発力発生装置の投擲物体に付与可能な最大運動量と、提案する装置のねじりばねの直列構造に蓄積される弾性エネルギーを調べるために、重量物の引き上げ実験を行った。この

Fig. 13 Velocity and position of a serial chain of torsion springs

実験では、ねじりばねの直列構造の中央部と重量物を紐で連結した状態で飛び移り座屈を生じさせ、ねじりばねの直列構造により、静止状態にある重量物が引き上げられた高さを計測した。この高さをもとに、最大運動量と蓄積弾性エネルギーを概算した。重量物の質量は 12.5 [kg] であり、ねじりばねの直列構造および瞬発力発生装置の仕様は、座屈試験と同様である (Table 3, Table 4)。また、重量物の引き上げ開始位置は、3.1 節の計測にて得られた、直列構造が最高速度を有する位置である。

実験の結果、提案する瞬発力発生装置では、12.5 [kg] の重量物を約 0.08 [m] の高さまで引き上げ可能であること、引き上げを経て、ねじりばねの直列構造の運動がほぼ停止することが確認できた。このことは、直列構造の運動量の大半が重量物の運動量へと変換されたことを示す。この引き上げ高さの 0.08 [m] の値から算出した、重量物の引き上げ初速度は約 1.3 [m/s] である。ここで、ねじりばねの直列構造の運動部を、鉛直上向きに直線運動する質量 M [kg] の質点とみなす。ねじりばねの直列構造の最高速度が $V_{\max}$ [m/s]、引き上げ後のねじりばねの直列構造の速度が V' [m/s]、重量物質量が m [kg]、引き上げ時の重量物の初速度が v_0 [m/s]、運動量の伝達損失が α であるとする、運動量保存の法則から、

$$MV_{\max} = MV' + mv_0 + \alpha \quad (2)$$

と記述できる。 α や V' の代わりに、運動量の伝達効率 η ($0 \leq \eta \leq 1$) を、

$$\eta := 1 - \frac{MV' + \alpha}{MV_{\max}} \quad (3)$$

と定義すると、

$$mv_0 = \eta MV_{\max} \quad (4)$$

を得る。よって、直列構造の全運動量が重量物の運動量へと変換されたと仮定すると、 $\eta = 1$ であり、各値を代入すると、

$$M = \frac{mv_0}{\eta V_{\max}} \doteq 1.6 \text{ [kg]} \quad (5)$$

を得る。この値から、ねじりばねの直列構造が最高速度 10 [m/s]

で運動した際に、投擲物に付与可能な最大運動量 $p_{\max}$ [Ns] は、

$$p_{\max} := MV_{\max} \doteq 16 \text{ [Ns]} \quad (6)$$

と求まる。また、ねじりばねの直列構造の最高速度時に、ねじりばねの直列構造に蓄積された全弾性エネルギーが、運動エネルギーへとすべて変換されたとすると、ねじりばねの直列構造に蓄積された弾性エネルギー $E_{\max}$ [J] は、以下のように求まる。

$$E_{\max} := \frac{1}{2} MV_{\max}^2 \doteq 80 \text{ [J]} \quad (7)$$

Table 1 に示した運動量 p の値は、投擲物体の運動量であるため、単純比較はできないが、提案する瞬発力発生装置は、これらの運動量の値よりも大きな最大運動量を生成できることから、高い投擲能力を発揮できる可能性を有していると言える。提案する装置は、蓄積される弾性エネルギーは驚くほどの値ではないが、エネルギーの蓄積をヒトの無理のない踏みつけで実現できること、さらには、物体に対して付与可能な最大運動量が大いところに特徴がある。

3.3 投擲能力の計測

提案するねじりばねの直列構造に基づく瞬発力発生装置を用い、投擲能力の検証を行った。この検証でのねじりばねの直列構造および瞬発力発生装置の仕様は、飛び移り座屈試験と同様である (Table 3, Table 4)。この検証では、瞬発力発生装置によって物体を投擲した際の投擲高さを計測した。物体投擲方法は、ねじりばねの直列構造上に積載した物体を、ねじりばねの直列構造により押し上げて投擲する「押し上げによる投擲」と、静止状態にある物体に対し、ねじりばねの直列構造によって打撃を加えることで投擲を行う「打撃による投擲」の 2 種類である。以下に投擲方法別に検証内容を述べる。

3.3.1 押し上げによる投擲

押し上げによる投擲実験では、提案する瞬発力発生装置を用い、ねじりばねの直列構造上に配置された物体を、ねじりばねの直列構造によって押し上げて投擲し、物体の初期位置と投擲後の物体の最高到達位置の差である投擲高さ H_u [m] を計測した。Fig. 14 は押し上げによる物体投擲の様子である。押し上げによる投擲では、ねじりばねの直列構造上にあらかじめ積載された物体を投擲するため、ねじりばねの直列構造上に積載可能な範囲内の接触面積を有する物体に投擲物を限定した。この実験で投擲を行った物体質量は、0.028, 0.046, 0.130, 0.137, 0.480, 1.2, 2.0 [kg] である[†]。

Fig. 15 は、押し上げによる投擲高さ計測の結果である^{††}。このグラフの横軸は投擲物体の質量であり、縦軸は、物体の投擲高さである。また、Fig. 15 には、ねじりばねの直列構造の運動部の質量 M を考慮した、物体投擲高さ H_i [m] のグラフも併せて示してある。ここで、物体の質量がそれほど大きくなければ、ねじりばねの直列構造の遷移形状は変化しない。したがって、ねじりばねの直列構造に蓄積されるエネルギーは、物体を載せていないときの値 $E_{\max}$ とほぼ同じと考えてよい。これより、ねじりばねの直列構造上に積載された物体質量が m [kg]、ねじりばねの直列構造の運動部の質量が M [kg]、質量 m の物体積載時のねじりばねの直列構造の最高速度が $V_{\max}(m)$ であ

[†] 30 [g] 程度の軽量物から 2 [kg] の比較的重い物体まで、投擲条件に適い、かつ入手容易な物体を利用した。このため、質量の変化は線形的でもなければ指数的でもないが、傾向を捉えることは可能である。

^{††} 投擲高さにある程度の再現性があることを確認した上で、各質量に対して 1 回の計測を行い、プロットしたグラフである。複数回の計測の平均値ではないことに注意されたい。

Fig. 14 Throwing by upthrust

Fig. 15 Height of objects to be thrown with different masses by upthrust

るとすると,

$$\frac{1}{2}(m+M)V_{\max}^2(m) = E_{\max} \quad (8)$$

が成り立つ. また, 投擲物体に関するエネルギー保存則より, 重力加速度 g [m/s²] を用いて,

$$mgH_i = \frac{1}{2}mV_{\max}^2(m) \quad (9)$$

とかける. 上記 2 式より,

$$H_i = \frac{E_{\max}}{g(m+M)} \doteq \frac{8.2}{m+1.6} \quad (10)$$

の反比例のグラフを得る. 計測した投擲高さ H_u と H_i を比較すると, 計測値である H_u と計算値である H_i は, 投擲物体の質量が大きいつきに損失がやや大きい, おおむね一致することが確認できる.

Watari らが提案している MB Cylinder [3] では, 約 0.4 [kg] の物体を約 3.5 [m] の高さまで投擲可能な性能を実現している. 提案する瞬発力発生装置では, 0.480 [kg] の物体を 4.3 [m] の高さまで投擲可能である. このことから, 提案する装置は, MB Cylinder と比較して, 遜色ない瞬発力発生性能を有していることが確認できる. しかも, この性能が, ヒトによる無理のない踏みつけで装置を駆動することにより, 実現されていることに注目されたい. また, ねじりばねの直列構造の運動部の質量 M が 1.6 [kg] と大きいので, 投擲物体の質量変化に対するエ

Fig. 16 Throwing by hitting

Fig. 17 Height of objects to be thrown with different masses by hitting

ネルギー損失の感度が小さい. さらに, 押し上げによって物体投擲を行うため, 投擲物体に大きな衝撃力は加わらない. よって, あらゆる投擲物に利用可能であり, 汎用性の高い投擲ツールを実現している.

3.3.2 打撃による投擲

提案する瞬発力発生装置は, 3.2 節で示したように, 投擲物体に付与可能な最大運動量が大いに特徴がある. したがって, 押し上げによる投擲よりも, 運動量保存則に支配される打撃による投擲が, より有効であると考えられる.

打撃による投擲実験では, 提案する瞬発力発生装置を用い, 静止状態にある物体を, 飛び移り座屈中のねじりばねの直列構造により打撃した際の物体の投擲高さ H_h [m] を計測した. Fig. 16 は, 打撃による物体投擲の様子である. 計測する投擲高さは, 静止状態にある物体の初期位置と投擲後の物体の最高到達位置の差であり, 投擲物体の初期位置は, 3.1 節の計測にて得られた, ねじりばねの直列構造が最高速度を有する地点である. 打撃による投擲では, 瞬発力発生装置とは別に設けられた積載部上に配置された物体を, 積載部とともにねじりばねの直列構造によって打撃することで投擲を行う. このため, 積載部質量による投擲高さへの影響を低減するために積載部には軽量の筒状の紙を用いた. この紙製の積載部は低強度であることから, 投擲物体は軽量物に限定し, 投擲物体の質量を, 0.014, 0.046, 0.063, 0.137, 0.330 [kg] の 5 段階に変化させて投擲実験を行った.

Fig. 17 は, 打撃による投擲高さ計測の結果である[†]. このグラフの横軸は投擲物の質量であり, 縦軸は, 物体の投擲高さである. また, Fig. 15 と同様に, ねじりばねの直列構造の運動部

[†] 先と同様, 投擲高さのある程度の再現性を確認しているが, グラフのプロットは, 複数回の計測の平均値ではないことに注意されたい.

の質量 M を考慮した、物体投擲高さ H_i [m] のグラフも併せて示してある。この図から、計測値のプロットが H_i のグラフよりもはるか上方に位置していることが確認できる。0.014 [kg] の物体では、投擲時の物体の初速度が約 14 [m/s] と求まり、ねじりばねの直列構造の最高速度 10 [m/s] 以上の初速度で投擲されている。このことから、投擲物体が衝撃力に対して頑健であれば、打撃による投擲は、押し上げによる投擲よりも、少なくとも軽量物に対して有効であることが示された。

4. おわりに

本研究では、ねじりばねの直列構造に基づく瞬発力発生装置を提案した。提案する瞬発力発生装置のねじりばねの直列構造は、従来の連続体の帯状弾性体では実現困難であった、可撓性と高弾性を兼ね備えていることを検証実験により示し、ねじりばねの直列構造の有効性を確認した。提案する瞬発力発生装置が、投擲物体に対して与えられる最大の運動量は約 16 [Ns] であり、この装置が高い瞬発力発生能力を有していることを確認した。また、提案する瞬発力発生装置は、軽量の物体から比較的重量のある物体まで対象を限定せずに投擲できることを検証実験により示し、汎用性の高い投擲ツールを実現していることを確認した。さらに、提案する瞬発力発生装置では、必要最大駆動トルクが 21 [Nm] であり、ヒトの無理のない踏みつけによる受動駆動が可能であることを確認した。

提案するねじりばねの直列構造において、弾性板の厚みや長さとの弾性係数の間の関係は明らかになっていない。設計手法の確立のために、理論的な検討が今後必要である。物体投擲を伴うタスクでは、投擲精度が必要となる状況が存在する。今後は、投擲精度の検証を行い、提案する瞬発力発生装置の物体投擲能力の向上を図っていく。本稿では、提案装置の投擲能力を概算的に把握するために、その動力学は考慮していない。より正確な挙動の予測が求められる場合は、動力学解析が必要となる。また、提案する装置の高い瞬発力発生能力を、大型の走行・跳躍移動ロボットの脚へ利用することも検討していく。

参考文献

- [1] T. Senoo, A. Namiki and M. Ishikawa: "High-speed Throwing Motion Based on Kinetic Chain Approach," Proc. of the 2008 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS08), pp.3206–3211, 2008.
- [2] H. Arisumi, K. Yokoi, T. Kotoku and K. Komoriya: "Casting Manipulation (Experiments of Swing and Gripper Throwing Control)," JSME International Journal of Mechanical Systems, Machine elements and Manufacturing, vol.45, no.1, pp.267–274, 2002.
- [3] E. Watari, H. Tsukagoshi, Y. Kitagawa and A. Kitagawa: "MAGNETIC BRAKE CYLINDER TO ENHANCE TRAVERSE ABILITY AND ITS APPLICATION TO RESCUE ROBOTS," Proc. of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, pp.533–538, 2008.
- [4] F. Kikuchi, Y. Ota and S. Hirose: "Basic Performance Experiments for jumping Quadruped," Proc. of the 2003 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS03), pp.3378–3383, 2003.
- [5] Sandia National Laboratories, <http://www.sandia.gov/media/NewsRel/NR2000/hoppers.htm>
- [6] M. Kaneko, M. Higashimori, R. Takenaka, A. Namiki and M. Ishikawa: "The 100 G Capturing Robot—Too Fast To See—," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.8, no.1, pp.37–44, 2003.
- [7] M. Kovac, M. Fuchs, A. Guignard, J.C. Zufferey and D. Floreano: "A miniature 7g jumping robot," Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA08), pp.373–378, 2008.
- [8] Y. Sugiyama, A. Shiotsu, M. Yamanaka and S. Hirai: "Circular/Spherical Robots for Crawling and Jumping," Proc. of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA05), pp.3606–3611, 2005.
- [9] H. Mochiyama, M. Watari and H. Fujimoto: "A Robotic Catapult based on the Closed Elastica and Its Application to Robotic Tasks," Proc. of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS07), pp.1508–1513, 2007.
- [10] 市川泰久, 望山洋, 藤本英雄: "弾性体整形による高出力型閉ループ柔軟カタパルト", 第9回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3H2-2, 2008.

市川泰久 (Yasuhisa Ichikawa)

2008 年神奈川工科大学工学部機械工学科卒業。2010 年筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻博士前期課程修了。同年三菱重工業株式会社入社、現在に至る。

(日本ロボット学会学生会員)

藤本英雄 (Hideo Fujimoto)

1970 年名古屋大学工学部機械工学科卒業。現在名古屋工業大学教授。医学工学や感性の工学、ロボティクスなどに興味を持つ。工学博士。ASME 最優秀論文賞など多数受賞。スケジューリング学会会長、SICE 常務理事、文部科学省科学技術学術審議会文化資源委員会委員、愛知県ものづくり人材育成

協議会座長、名古屋工業大学ものづくりテクノセンター長、理化学研究所研究員など歴任。日本機械学会フェロー・評議員、日本ロボット学会理事。

(日本ロボット学会正会員)

望山 洋 (Hiromi Mochiyama)

1993 年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。1995 年同大学理工学研究科修士課程電気工学専攻修了。1998 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年同大学助手。1999 年防衛大学校機械工学教室助手。2000 年同校機械システム工学科講師。2003 年名古屋工業大学機械工学科トヨタ自動車寄附講座助教授。2007 年筑波大学大学院システム情報工学研究科准教授、現在に至る。柔軟ロボット学の研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会、IEEE 会員。博士 (情報科学)。

(日本ロボット学会正会員)