

# 跳躍ロボットのための非対称型閉ループ柔軟カタパルト

山田 篤史<sup>\*1</sup> 渡 正充<sup>\*1</sup> 望山 洋<sup>\*2</sup> 藤本 英雄<sup>\*1</sup>

## Asymmetric Robotic Catapults based on the Closed Elastica for Jumping Robot

Atsushi Yamada<sup>\*1</sup>, Masamitsu Watari<sup>\*1</sup>, Hiromi Mochiyama<sup>\*2</sup> and Hideo Fujimoto<sup>\*1</sup>

In this paper, we propose new asymmetric robotic catapults based on the closed elastica. The conventional robotic catapults based on the closed elastica the authors developed are the robotic elements for generating impulsive motions by utilizing the snap-through buckling. In a typical closed elastic catapult, the two ends of an elastic strip are fixed to a passive rotational joint and an active rotational joint, respectively. Here, we found that we could obtain higher impulsive motions by adding the range limitation to a passive rotational joint which makes the shape of the elastic strip just before snap-through buckling complicated. The range limitation leads to storing the higher elastic energy for an impulsive motion without changing the actuator of the active joint. We show the results of theoretical analysis and numerical simulations which support the effectiveness of the proposed robotic catapults. We also show that the jumping robot with the asymmetric robotic catapult achieves high performance.

**Key Words:** Flexible Robot, Closed Link, Impulsive Motions, Snap-through Buckling, Jumping Robot

### 1. はじめに

自然界には、体の小さい蚤 [1] やカメレオン [2] [3] などのように、重力の何倍もの加速度を伴う高加速度運動を行う生物が存在する。本研究の目的は、これら生物のようなしなやかで俊敏な動作をロボットで実現することである。バッタや蚤、コオロギなどは体が軽く小さいにもかかわらず、高加速度を伴う高い跳躍能力により、1回の跳躍で目を見張るような距離を移動する。高加速度運動を行うカメレオンや蚤などに見られる特殊な生物的カタパルト機構の存在 [1]~[3] は、インパルス状の瞬時高加速度運動の生成が、生物らしい動きを達成する鍵であることを示唆する。小型軽量の生物が持つこのカタパルト機構のロボット実現により、Raibert [4] のロボットが実現したカンガルーのようなホッピングとは異なり、できるだけ多く蓄えたポテンシャルエネルギーを瞬時に放出することで、1回で長距離の跳躍を行う手のひらサイズ程のコンパクトな小型ロボットの実現が期待できる。

近年、瞬発的な跳躍動作を行ういくつかのロボットが提案されている。Hirose らは、強力な空気圧アクチュエータによって駆動される脚によって跳躍する4足歩行ロボットを開発している [5] [6]。足先に車輪を有するこのロボットの改良型では、体

長約 0.3 [m] に対して、およそ 0.7 [m] の高さまで跳躍可能である。塚越らは、エネルギー源として圧縮空気を用いたアクチュエータと、マグネットを用いたブレーキシリングを用いることによって、体長約 0.25 [m] に対して、1.0 [m] を超える跳躍を可能とするレスキュー用ロボットを開発している [7]。Hirose らのロボットと塚越らのロボットは、高度なロボット技術を用いて高加速度運動を実現しているが、空気圧システムを用いているので、小型化を実現するのは容易ではない。Nassiraei らは、偏心カムを利用したメカニズムで急激な速度変化を伴う運動を実現するアクロバットロボットを制作している [8] [9]。しかし、その機構は複雑であり、小型化が容易ではない。近年、Scarfoglio らは 2 [Hz] の周波数で連続的に駆動する跳躍ロボットのためのクリックメカニズムを提案した [10]。このロボットでは、偏心型のカムを用いてロボットの脚を駆動するねじればねに負荷をかけている。しかし、小型ではあるがその機構は複雑であり、跳躍距離が十分とは言い難い。高信らは、ねじりコイルばねにエネルギーを蓄え、放出するクリックメカニズムを用いて、コオロギを規範とした跳躍ロボットを提案している [11]。このロボットは、制御器やバッテリーをすべて内蔵して小型化を実現しているが、跳躍するために十分なエネルギーを蓄えることができず、跳躍距離が短い。平井らは、柔軟物の大変形により蓄えた弾性エネルギーを積極的に利用した円形・球形柔軟ロボットを開発している [12]。このロボットの全質量は 4 [g] と軽量であり、アクチュエータに形状記憶合金 (SMA) を用いて体長の 3.3 倍もの高さまで跳躍することができる。しかし、跳躍準備を整えるまでには 30 [sec] 以上を要するので、高加速度運動の繰り返

原稿受付 2007年9月29日

<sup>\*1</sup>名古屋工業大学

<sup>\*2</sup>筑波大学

<sup>\*1</sup>Nagoya Institute of Technology

<sup>\*2</sup>University of Tsukuba

■ 本論文は学術性で評価されました。

しは、数 [Hz] 程度であっても困難である。一方、Fischer らは、燃焼機関を用いた跳躍ロボットを開発している [13]。このロボットは 20 [g] のタンク一つで約 4,000 回もの跳躍動作が可能である。しかし、燃焼機関を用いているので、扱いやすさという点で疑問が残る。

筆者らは、小型自立ロボットで小型の生物のような高加速度運動を繰り返し生成するロボット要素として、新たに柔軟閉ループ構造に基づくロボットカタパルトを提案した [14]~[16]。閉ループ柔軟カタパルトと名付けられたこのロボットカタパルトは、たわませた帯状柔軟物の両端を二つの回転関節に固定しただけの簡単な閉ループ機構である。回転関節をゆっくりと前後に駆動することで、帯状柔軟物の瞬時高加速度運動を繰り返し生成することができる。瞬時高加速度運動は、弾性材料の飛び移り座屈 (snap-through buckling) 現象 [17] [18] によって生じ、その大きさは、座屈が起こる前の変形によって蓄えられる弾性エネルギーの大きさに依存する。この飛び移り座屈を発生させる閉ループ構造は特別なトリガメカニズムを必要としないため、小型化が容易である点が特徴である。

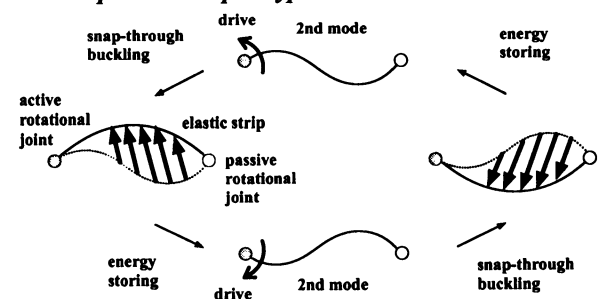
本研究では、最大駆動トルク一定の条件の元で、より大きな弾性エネルギーを蓄えることができる新しい非対称型の閉ループ柔軟カタパルトを提案する。これまでに提案しているロボットカタパルトでは、大きな瞬時高加速度運動を得るために必要な弾性エネルギーをできるだけ多く蓄えるためには、帯状柔軟物の剛性を大きくしていた [15] が、剛性を大きくすると、帯状柔軟物を変形させるために必要な駆動トルクも大きくなる。しかし、提案する非対称型では、従来のロボットカタパルトで用いたアクチュエータを取り替えることなく、より大きな弾性エネルギーを蓄えることができることを示す。そして、提案したロボットカタパルトを用いることで、手のひらに乗る程度の小型ながら 200 [mm] の高さ、700 [mm] もの距離を跳躍することができるコンパクトな跳躍ロボットのプロトタイプを提案する。

以下、まず第 2 章では、非対称型閉ループ柔軟カタパルトのメカニズムと特徴を、静力学解析と数値解析を用いて説明する。第 3 章では、非対称型の閉ループ柔軟カタパルトの跳躍ロボットへの適用について説明する。第 4 章では、本稿の結果をまとめ、将来展望を示す。

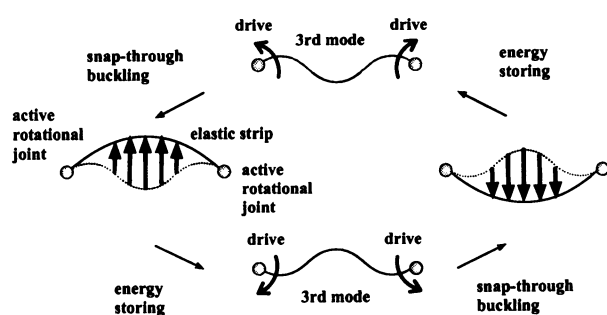
## 2. 閉ループ構造に基づく非対称型ロボットカタパルト

Fig. 1 は、閉ループ柔軟カタパルトの平面模式図である。図には、これまでに提案した片端駆動型、両端駆動型の二つの閉ループ柔軟カタパルト [15] と、本稿で提案する非対称型の閉ループ柔軟カタパルトを示す。片端駆動型は、受動関節とモータで駆動する能動関節から構成される。能動関節を時計回りにゆっくりと駆動すると、飛び移り座屈が生じる前に帯状柔軟物は 'S' 字を寝かせた形状 (2 次モード) に変形する。一方、両端駆動型は、二つのモータで駆動する二つの能動関節から構成される。それらの回転関節は、互いに反対方向に同じ角度だけ動かすものとする。両端をゆっくりと回転させると、飛び移り座屈が生じる前に帯状柔軟物は 'W' 字型の形状 (3 次モード) に変形する。どちらのタイプもさらに能動関節を回転させると、帯状柔軟物に飛び移り座屈が発生し、瞬時高加速度運動を得ることが

### Active-passive catapult type



### Active-active catapult type



### Asymmetric catapult type

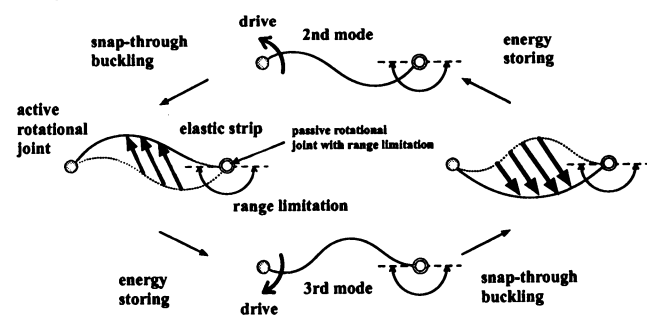


Fig. 1 Shape transitions of conventional planar type robotic catapults and proposed asymmetric robotic catapult based on the closed elastica and its impulsive motions. The shape in the 2<sup>nd</sup> mode has two extrema and the shape in the 3<sup>rd</sup> mode has three extrema

できる。更に、飛び移り座屈が生じた後に能動関節を反時計回りに駆動することで、反対向きの飛び移り座屈を得ることができるので、能動関節を往復して駆動するだけで、比較的速い周波数で瞬時高加速度運動を繰り返し生成することができる。提案する非対称型閉ループ柔軟カタパルトは、能動関節と回転制限付き受動関節から構成される。受動関節は回転制限の範囲内では単なるフリージョイントとして振る舞う。図の左側に示した、受動関節が時計回り側の回転制限角度に位置している状態から、能動関節を時計回りにゆっくりと駆動すると、二つの関節が対称の角度となったときに、帯状柔軟物の形状は両端駆動型と同じ 'W' 字型の対称形状になる。能動関節を更に同じ方向にゆっくりと駆動し続けると、帯状柔軟物に飛び移り座屈が生じる。また、能動関節を往復運動させることで、飛び移り座屈を繰り返し生成することができる。しかし、従来型が上下に対称に瞬時高加速度運動を生成できるのに対して、本稿で提案す

るロボットカタパルトは非対称、すなわち一方に大きな瞬時高加速度運動を生成し、もう一方には大きな瞬時高加速度運動を生成しない。本章では、始めに、静力学解析により片端駆動型の受動関節に回転範囲の制限を設けるだけで、従来の片端駆動型よりも带状柔軟物を複雑な形状にすることができることを示す。次に、数値シミュレーションにより、提案する非対称型閉ループ柔軟カタパルトは、同じアクチュエータを用いた場合に従来の片端駆動型と比較してより大きな弾性エネルギーを蓄えることができることを示す。

2.1 ロボットカタパルトの平衡式

連続体である带状柔軟物を、Fig. 2 に示すように弾性を持つ各関節をリンクで接続した直鎖で近似する。i 番目のリンク先端の位置ベクトルを  $\mathbf{p}_i \in \mathbb{R}^3$ 、リンク姿勢を  $\Phi_i \in SO(3)$  ( $i = 1, \dots, n$ ) [19] で与える。n はリンク数を表す。しばらくの間、 $\mathbf{p}_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$  としておく。直鎖近似を用いて带状柔軟物の閉ループ構造を表現するために、拘束力  $\lambda = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ 0]^T$  と拘束トルク  $\tau = [0 \ 0 \ \tau_3]^T$  を直鎖先端に印加する。 $\lambda$  は拘束式  $\mathbf{p}_n = \mathbf{p}_d = [x_d \ 0 \ 0]^T$  を、 $\tau$  は拘束式  $\Phi_n = \Phi_d$  を満たすように加えるとする。静力学に関する拘束条件は次式で与えられる [16]。

$$\frac{\partial K^T}{\partial \theta} - J_b^T \begin{bmatrix} \lambda \\ \tau \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{p}_n = \mathbf{p}_d \quad (2)$$

$$\Phi_n = \Phi_d, \quad (3)$$

ここで、K は带状柔軟物に蓄えられる弾性エネルギーを表す。 $J_b \in \mathbb{R}^{6 \times n}$  は拘束力と拘束トルクを等価な関節トルクに変換するヤコビ行列を表す。関節の曲げに関する弾性は、干渉がなく、各関節で一様であると仮定し、その弾性係数を k で表す。このとき、弾性エネルギー K は次式で与えられる。

$$K(\theta) = \frac{k}{2} \theta^T \theta \quad (4)$$

ここで、 $\theta = [\theta_1 \ \dots \ \theta_n]^T \in \mathbb{R}^n$  である。 $\theta_0$  は根元関節の角度を表す (Fig. 2)。式 (1) から、各関節の静力学は次式で与えられる [16]。

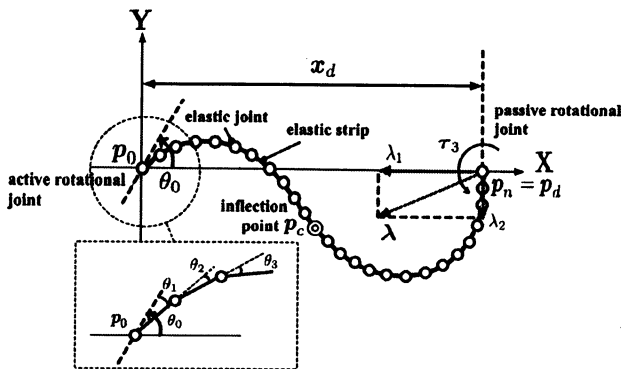


Fig. 2 The relation between shape of the elastic strip and constraint forces of the robotic catapult

$$k\theta_i - \mathbf{e}_z^T \{(\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_{i-1}) \times \lambda + \tau\} = 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{e}_z = [0 \ 0 \ 1]^T$  は z 方向の単位ベクトルを表す。式 (5) は、i 番目の関節の曲げ剛性による関節トルクが、曲げの回転軸ベクトル  $\mathbf{e}_z$  に作用する手先の拘束トルク  $\tau$  と位置  $\mathbf{p}_{i-1}$  に作用する拘束力  $\lambda$  がなすモーメントと釣り合うことを示している。直鎖の根元関節の駆動トルク  $\tau_0$  は、根元関節の剛性による復元力と等価であるので、

$$\tau_0 = -k\theta_1 \quad (6)$$

が成り立つことに注意する。片端駆動型の場合には、直鎖先端を固定した回転関節はフリージョイントであるので、 $\tau = \mathbf{0}$  である。両端駆動型では、二つの能動関節を互いに反対向きに同じ角度だけ駆動するので、第 1 関節に関する拘束は次式で表される。

$$\tau_3 = -\tau_0. \quad (7)$$

2.2 回転制限付き受動関節

先端に拘束トルク  $\tau_3$  が加わる直鎖モデルを考える。拘束トルク  $\tau_3$  は、直鎖先端が x 軸となす角度  $\theta_{tip}$  が常に一定となるように加えるとする。式 (6) を直鎖の根元関節 ( $i = 1$ ) に関する静力学 (5) に代入すると、根元関節の駆動トルクは次式で与えられる。

$$\tau_0 = -\mathbf{e}_z^T (\mathbf{p}_n \times \lambda + \tau). \quad (8)$$

带状柔軟物の先端は角度  $\theta_{tip}$  で固定されているので、Fig. 3 (a) に示すように、初期状態 ( $\tau_0 = 0$ ) で带状柔軟物には変曲点  $\mathbf{p}_c = [x_c \ y_c \ 0]^T$  が存在する。带状柔軟物上に存在する変曲点  $\mathbf{p}_c$  での静力学は次式で与えられる。

$$\mathbf{e}_z^T \{(\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_c) \times \lambda + \tau\} = 0. \quad (9)$$

式 (8) を式 (9) に代入すると、

$$\tau_0 = -\mathbf{e}_z^T (\mathbf{p}_c \times \lambda) \quad (10)$$

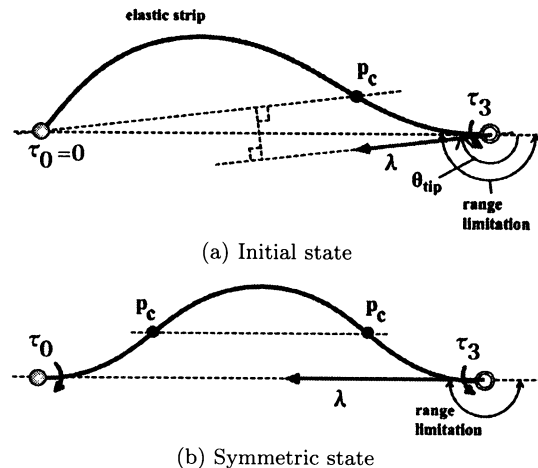


Fig. 3 Deformation of an asymmetric catapult type

となる。初期状態 ( $\tau_0 = 0$ ) のとき、Fig. 3(a) に示すように、帯状柔軟物上の  $x_c > 0, y_c > 0$  の範囲に変曲点  $p_c$  が存在するように  $\theta_{tip}$  を設定した場合を考える。このとき、式 (10) より、原点から  $p_c$  への位置ベクトルと直鎖先端の拘束力ベクトル  $\lambda$  は平行となる。ロボットカタパルトは回転関節軸間の距離  $x_d$  が帯状柔軟物の長さに対して短いので、直鎖の先端に加えられる拘束力ベクトル  $\lambda$  の x 方向成分  $\lambda_1$  は常に負である。よって、初期状態における拘束力ベクトル  $\lambda$  は Fig. 3(a) に示す向きになるので、 $\lambda_2$  は負の値をとる。式 (8) を各ベクトルの成分を用いて記述すると次式となる。

$$\tau_0 + \tau_3 = -x_d \lambda_2. \tag{11}$$

よって式 (11) より、初期状態 ( $\tau_0 = 0$ ) では拘束トルク  $\tau_3$  は正であることが分かる。次に能動関節を初期形状から時計回りに駆動し、帯状柔軟物はその中心を通る垂線に対して対称な形状に変形した時点を考える (Fig. 3(b))。  $\tau_0$  は能動関節を時計回りに駆動しているときは常に負であることに注意すると、このとき、帯状柔軟物は両端駆動型と同様に式 (7) を満足するので、 $\tau_3$  は正の値をとる。また、式 (11) より  $\lambda_2 = 0$  を満たす。拘束力  $\lambda$  は帯状柔軟物の変形と共に変化する。拘束力ベクトルの条件  $\lambda_2 = 0$  は帯状柔軟物が対称形状になったときに初めて成り立つので、 $\lambda_2$  を負から正に変化させるためには帯状柔軟物是对称形状を経由しなくてはならない。それゆえ、帯状柔軟物が初期形状から対称形状になるまでの間、 $\lambda_2$  は常に負の値をとる。よって式 (11) より、帯状柔軟物が初期形状から対称形状になるまでの間、 $\tau_3$  は常に正の値をとる。しかし、時計回りに駆動する場合には常に  $\tau_0$  が負であることに注意すると、変形途中に  $y_c < 0$  となるように直鎖先端の拘束角度  $\theta_{tip}$  を設計した場合には、式 (10) より  $\lambda_2$  は正となるので、帯状柔軟物是对称形状にならない可能性がある。

帯状柔軟物が初期形状から対称形状に変化するまで直鎖先端の拘束トルク  $\tau_3$  の符号が一定であることに注目すると、 $\tau_3$  を発生させるために二つ目のモータを用意する必要はなく、回転範囲に制限を設けた受動関節を用いて  $\tau_3$  を発生することができる。そこで本稿では、直鎖先端が x 軸となす角度が 0 から  $\theta_{tip}$  までの回転制限を設けた受動関節に固定された非対称型の閉ループ柔軟カタパルトを提案する。数値シミュレーションを用いて求めた非対称型閉ループ柔軟カタパルトの帯状柔軟物の変形形状を Fig. 4 に示す。シミュレーションパラメータは、リンクの自由度  $n = 30$ 、端点間距離  $x_d = 0.15$  [m]、各リンク長

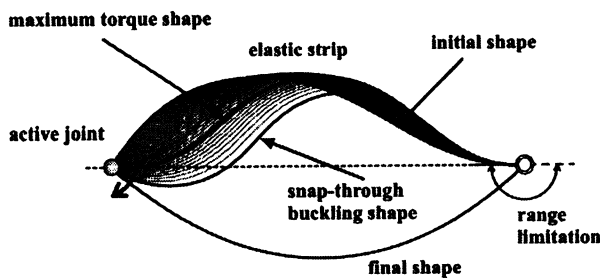


Fig. 4 Stick diagram of an asymmetric catapult type

さ  $l = 0.006$  [m]、拘束角度  $\theta_{tip} = -\pi$  とした。提案した回転制限付き受動関節を用いることで、能動関節が一つにもかかわらず、帯状柔軟物是对称形状に変形しているのが分かる。そしてある形状 (snap-through buckling shape) で飛び移り座屈が生じている。受動関節に十分な回転範囲を設定すると、飛び移り座屈が生じはじめてから、飛び移り座屈後のアーチ形状になるまでに提案した回転制限付き受動関節は単なるフリージョイントとして振る舞う。よって、受動関節に回転制限を設けるだけで、従来の片端駆動型よりも帯状柔軟物を複雑な形状に変形させた状態から、帯状柔軟物に発生する飛び移り座屈により蓄えた弾性エネルギーを瞬間的に放出することができる。

### 2.3 帯状柔軟物に蓄えられる弾性エネルギーの変化

Fig. 5, Fig. 6 に、提案した非対称型とこれまでに提案した片端、両端駆動型について、能動関節角度  $\theta_0$  に対する根元関節の駆動トルクと、その駆動トルクで帯状柔軟物に蓄えられる弾性エネルギーの変化をそれぞれ示す。横軸は、時計回りを正とする。Fig. 5 から、 $\theta_0$  がある角度になると駆動トルクは最大値をとり、飛び移り座屈が生じる前に駆動トルクが減少しているこ

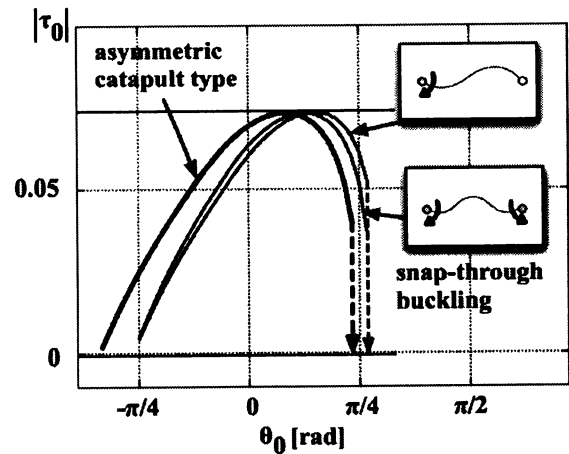


Fig. 5 Driving angle  $\theta_0$  vs driving torque  $\tau_0$  of an asymmetric catapult type

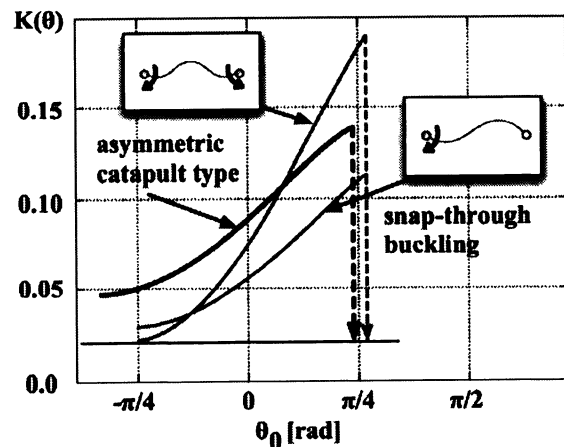


Fig. 6 Driving angle  $\theta_0$  vs stored elastic energy  $K(\theta)$  of an asymmetric catapult type



とが分かる．駆動トルクが最大になる形状 (maximum torque shape) を Fig. 4 に示す．一方, Fig. 6 より, 駆動トルクが減少しても, 弾性エネルギーの増加率はほとんど変化しない [16] ことが分かる．Fig. 6 に示す弾性エネルギーの変化は, Fig. 5 に示すように, 能動関節の最大駆動トルクを等しくして比較した値である．最大駆動トルクを等しくしたとき, 带状柔軟物に蓄えられる弾性エネルギーは, 片端駆動型よりも両端駆動型のほうが大きいことが分かる．また, 提案する非対称型は, 従来の片端駆動型よりも蓄えられる弾性エネルギーが大きいことが分かる．よって, 回転制限付き受動関節を用いることで, 能動関節を駆動するモータを変更することなく, 従来の片端駆動型よりもより大きな瞬時高加速度運動を生成することができる．

閉ループ柔軟カタパルトは単純な機械構造であり, 提案した回転制限付き受動関節も複雑ではないので小型軽量という特徴は損なわれていない．さらに, Fig. 1 に示すように, 片端駆動型の閉ループ柔軟カタパルトに提案する回転制限付き受動関節を用いることで非対称型になり, 一方にしか大きな瞬時高加速度を生成できないが, 根元関節のアクチュエータを往復動作させることで, 従来型が持つ瞬発的な動作を繰り返し生成できるという特性もまた維持されている．

### 3. 柔軟閉ループ構造に基づく跳躍ロボット

非対称型閉ループ柔軟カタパルトの質量を十分軽くすることができれば, このカタパルトを小型ロボットの跳躍動作のためのデバイスとして利用することができる．幸いロボットカタパルトは簡単な機械構造であるので, 十分軽量かつ小型化すること

とができる [20]．筆者らはこれまでに, 閉ループ柔軟構造を用いた様々なタイプの跳躍ロボットを提案している [21]．本章では, 数値シミュレーションを用いて, 非対称型閉ループ柔軟カタパルトを跳躍動作に応用したときの効果を解析する．

#### 3.1 プロトタイプ跳躍ロボット

Fig. 7 に提案する跳躍ロボットのプロトタイプを示す．使用した带状柔軟物は, 厚さ × 幅 × 長さが  $0.20 \times 12 \times 200$  [mm] のサイズの焼き入れ済み帯鋼 JIS G 3311 (通称: 焼き入れリボン鋼) を用いた．带状柔軟物が地面と接触する部分には, 滑りを防止するためにラバーシートを固定している (Fig. 8)．二つの回転関節軸間の距離は 150 [mm] である．能動関節は比較的小型のラジコンサーボモータ (RB90, MiniStudio Inc., Japan, 質量 9 [g], 最大トルク 0.0016 [kg·m]) で駆動される．ロボットをできるだけ軽量にするため, メインフレームには木材を使用している．PIC マイクロコンピュータ (12F675) と 9 [V] のドライセルバッテリーをそれぞれアクチュエータとエネルギーとして用いている．跳躍ロボットの諸元を Table 1 に示す．製作したロボットにはバッテリーおよび制御ボードは搭載していない．バッテリーおよび制御ボードを搭載しないロボットの質量はわずか 30 [g] である (バッテリーおよび制御ボードを含めると 96 [g] になる)．実験に使用しているドライセルバッテリーはロボット自体よりも重い．しかし, ロボットよりも軽量なりリチウムポリマバッテリーを使用することで軽量化が期待できる．带状柔軟物の一端を固定する回転制限付き受動関節には, 小型のヒンジを用いている． $\theta_{tip} = -\pi$  とした (Fig. 9)．带状柔軟物のもう一方の端部は, モータのプラスチックボディに直接固定している．この構造にすることで, 带状柔軟物の長軸上にモータの重心が位置するので, ロボットのロール回転を防ぐことが

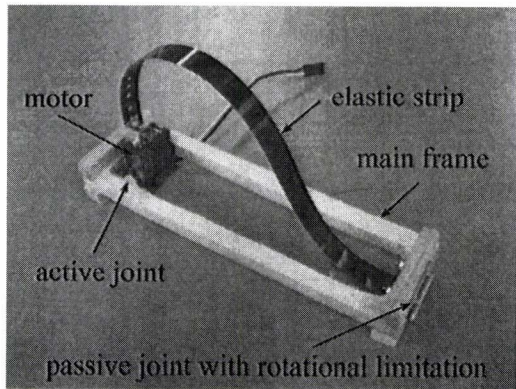


Fig. 7 A prototype jumping robot

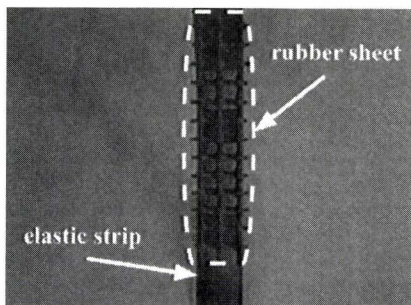


Fig. 8 A rubber sheet attached to the elastic strip

Table 1 Parameters of a prototype jumping robot

Robot parameter	Value
Mass	30 [g]
Body length	170 [mm]
Body height	90 [mm]
Body thickness	50 [mm]
Elastic strip length	200 [mm]
Elastic strip width	12 [mm]
Elastic strip thickness	0.20 [mm]
link length	23 [mm]

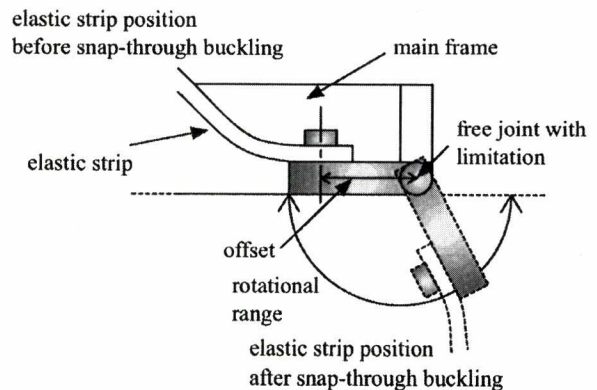


Fig. 9 Passive joint with rotational limitation

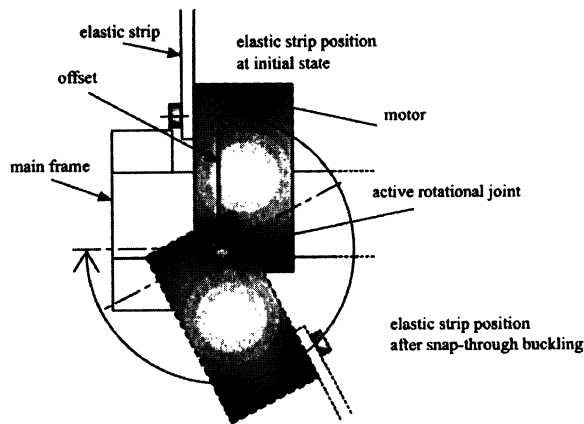


Fig. 10 Active joint with considerable offset

できる。しかし、Fig. 10 に示すように、この構造ではこれまでの片端駆動型や前章で提案した非対称型とも異なり、能動関節と带状柔軟物の端部の間に無視できないオフセットが存在する。

### 3.2 能動関節のオフセット構造の効果

従来の片端駆動型や両端駆動型および前章で提案した非対称型の閉ループ柔軟カタパルトは、带状柔軟物の端部が能動関節に直接固定されている。一方、Fig. 9 に示す受動関節のオフセットは無視できる程小さいのに対し、Fig. 10 に示す能動関節に見られるオフセット構造は、能動関節に剛体リンクを接続し、そのリンクの先端に带状柔軟物の端部を固定したリンク構造ととらえることができる。能動関節に固定されたリンクの先端位置は、能動関節角度  $\theta_0$  を用いて次式で表される。

$$\mathbf{p}_0 = [L \cos \theta_0 \ L \sin \theta_0 \ 0]^T. \quad (12)$$

ここで、 $L$  は Fig. 11 に示すように能動関節に固定されたリンクの長さを表す。この構造では、第1関節に関する拘束条件と、带状柔軟物の変曲点  $\mathbf{p}_c$  に関する条件はそれぞれ次式で表される。

$$\tau_0 = -\mathbf{e}_z^T \{(\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_0) \times \boldsymbol{\lambda} + \boldsymbol{\tau}\}, \quad (13)$$

$$-\mathbf{e}_z^T \{(\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_c) \times \boldsymbol{\lambda} + \boldsymbol{\tau}\} = 0. \quad (14)$$

式 (14) に式 (13) を代入すると、

$$\tau_0 = -\mathbf{e}_z^T \{(\mathbf{p}_c - \mathbf{p}_0) \times \boldsymbol{\lambda}\}. \quad (15)$$

となる。初期状態 ( $\tau_0 = 0$ ) を考える。二つの回転関節間の距離  $x_d$  は带状柔軟物の長さよりも短いので、 $\lambda_1$  は常に負である。制限付き受動関節の位置  $\mathbf{p}_d$  と  $\mathbf{p}_0$  の位置を考慮すると、式 (13) より、 $\lambda_2$  が負のとき、直鎖先端に加わる拘束トルク  $\tau_3$  は正となる。一方、式 (15) は位置ベクトル  $(\mathbf{p}_c - \mathbf{p}_0)$  と、直鎖先端に加わる拘束力ベクトル  $\boldsymbol{\lambda}$  が初期状態では平衡であることを示す (Fig. 11)。閉ループ柔軟カタパルトでは常に  $\lambda_1 < 0$  が成り立つので、 $\lambda_2$  は次式が成り立つとき、負になる。

$$y_c > L \sin \theta_0 \quad (16)$$

ここで、 $y_c$  は変曲点  $\mathbf{p}_c$  の  $y$  軸方向成分であり、右辺は  $\mathbf{p}_0$  の

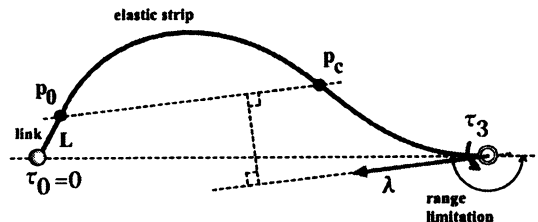


Fig. 11 Initial shape of a jumping robot

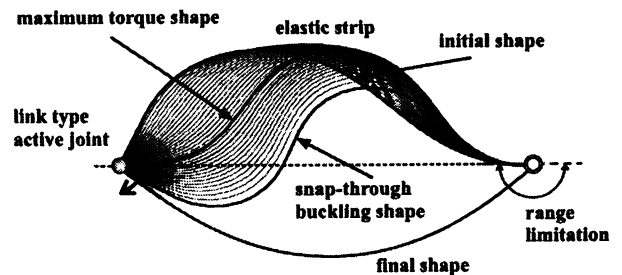


Fig. 12 Stick diagram of a jumping robot

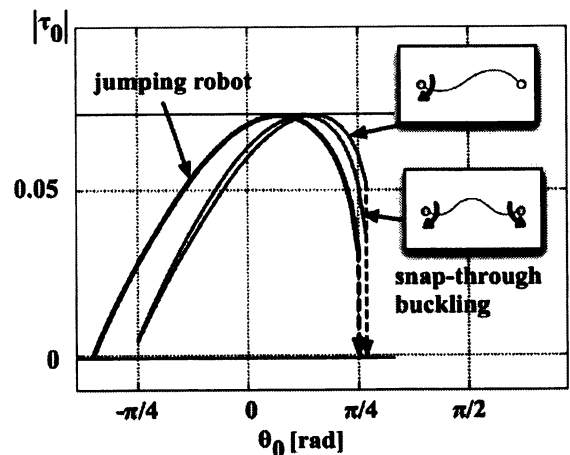


Fig. 13 Driving angle  $\theta_0$  vs driving torque  $\tau_0$  of a jumping robot

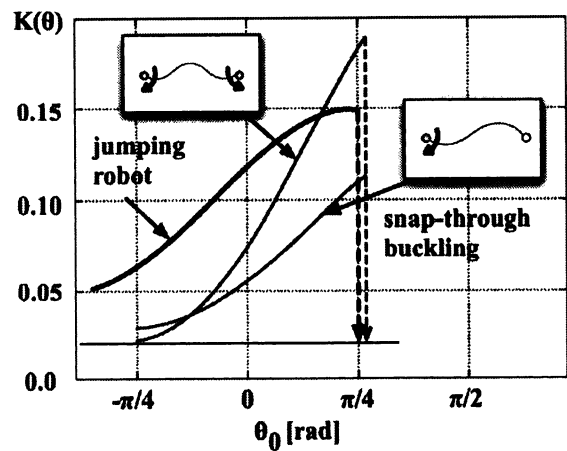


Fig. 14 Driving angle  $\theta_0$  vs stored elastic energy  $K(\theta)$  of a jumping robot



y 軸方向成分を表す. よって式 (16) を満足する状態, すなわち初期形状において Fig. 11 に示す  $p_0$  と  $p_c$  の位置関係のとき, リンク型の能動関節構造を持つ場合にも回転制限付き受動関節を利用することができる. 帯状柔軟物の変形を Fig. 12 に示す. 図より, 跳躍ロボットの持つリンク型の能動関節と回転

制限付き受動関節構造により, 帯状柔軟物はより複雑な形状に変形できることが分かる. Fig. 13, Fig. 14 に, 提案した跳躍ロボットと従来の片端, 両端駆動型について, 能動関節角度に対する駆動トルクと弾性エネルギーの変化をそれぞれ示す. 駆動トルクの最大値を等しくして比較した場合, 提案する跳躍ロ

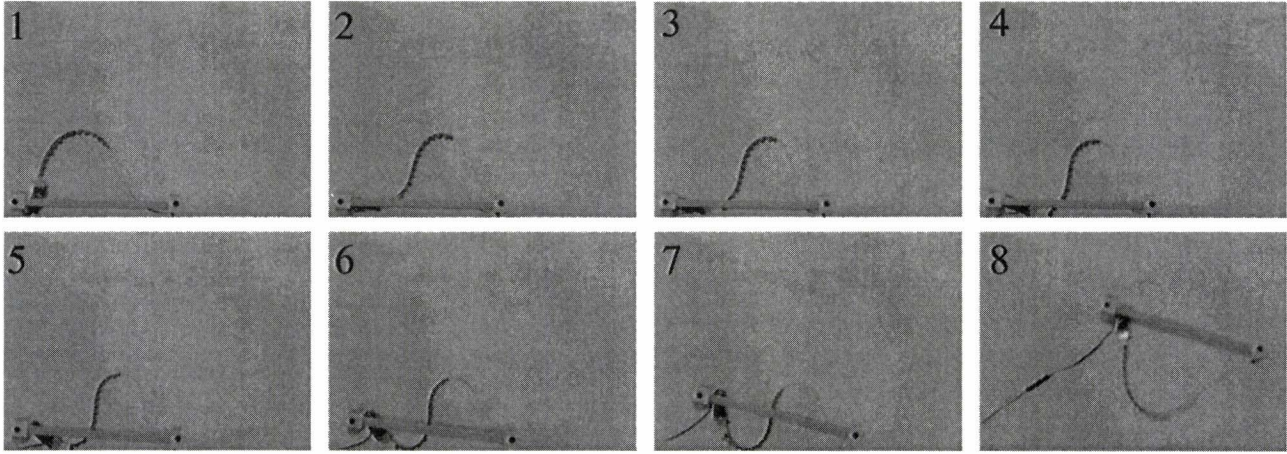


Fig. 15 A series of photos of jumping motion of a jumping robot using high-speed camera

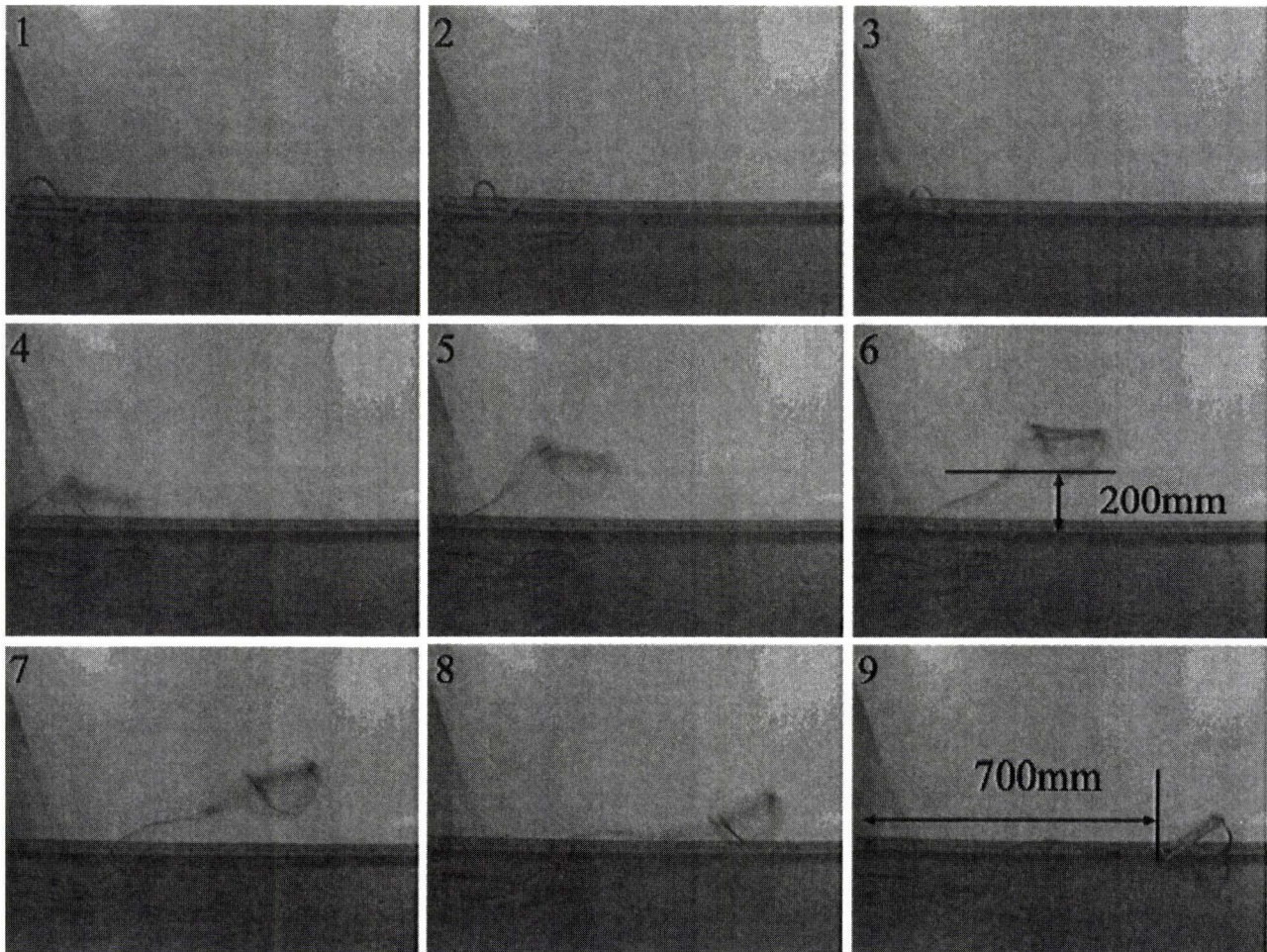


Fig. 16 A series of photos of a jumping robot that leaps over 700 [mm] away

ボットは、従来の片端駆動型よりも大きな弾性エネルギーを蓄えることができる。また、Fig. 6 に示した回転制限付き受動関節を持つ非対称型よりも大きな弾性エネルギーを蓄えられることが分かる。よって、跳躍ロボットに用いたリンク型の能動関節を持つ非対称型閉ループ柔軟カタパルトは、アクチュエータを変更することなく、片端駆動型や、単なる非対称型よりも大きな弾性エネルギーを蓄え、より大きな高加速度運動を生成することができる。

### 3.3 プロトタイプ跳躍ロボットの跳躍動作

Fig. 15 に、高速度カメラで撮影したプロトタイプ跳躍ロボットによる跳躍動作を示す。能動関節を時計回りにゆっくりと回転させると、帯状柔軟物は‘W’字形状に近い変形形状になる。そして、帯状柔軟物の一部が地面と接触し、メインフレームを持ち上げる。これはロボットが効果的に地面を蹴り上げる準備ができたことを意味する。能動関節の駆動を続けると、帯状柔軟物がさらに変形し、地面との接触点が帯状柔軟物の左から中心位置にスムーズに変化していく。その後、帯状柔軟物に飛び移り座屈が発生し、アーチ形状に急激に変形する。このとき地面を強く蹴ることになり、ロボットは跳躍する。跳躍の瞬間、帯状柔軟物に固定したラバーシートの効果により、帯状柔軟物は滑りをできるだけ抑えて地面を蹴ることができる。Fig. 16 にロボットの跳躍距離を示す。プロトタイプ跳躍ロボットは 200 [mm] の高さまで跳ね上がり、700 [mm] もの飛距離を跳躍した。飛距離は全長の 4 倍以上になる。この跳躍ロボットは、地面を強く押す瞬発的な運動を生成する飛び移り座屈を発生させるために帯状柔軟物の大変形を用いているが、アクチュエータとして制御しやすい電磁モータを用いているので、帯状柔軟物を初期形状から飛び移り座屈が生じる形状に変形させるためにわずか 2 [sec] 程しかかからない。そして Fig. 12 に示すように、アクチュエータを一つしか用いない閉ループ柔軟カタパルトに特有の、左右非対称である帯状柔軟物の変形形状により、進行方向への十分な跳躍距離を達成できている。製作したプロトタイプ跳躍ロボットは、短い時間で十分な跳躍距離を跳ぶことができる弾性エネルギーを蓄え、放出することができる。また、閉ループ柔軟カタパルトは繰り返し高加速度運動が発生できるので、連続的に跳躍動作を行うことができる。さらに、提案する機構はとても単純なので、より小型化した跳躍ロボットを製作することに適していると言える。

## 4. おわりに

本稿では、弾性体の飛び移り座屈による瞬時高加速度運動を生成するロボット要素として筆者らが提案している。柔軟閉ループ構造に基づくロボットカタパルトの非対称型を新しく提案した。提案した非対称型閉ループ柔軟カタパルトは回転制限付き受動関節と通常の能動関節を持つ。静力学解析により、一つの能動関節と回転制限付き受動関節を用いることで、帯状柔軟物を、二つの能動関節を持つ両端駆動型のロボットカタパルトと同じ変形形状にすることができることを示した。数値解析により、非対称型では能動関節を駆動するモータを変更することなく、これまでの片端駆動型よりも大きな弾性エネルギーを帯状柔軟物に蓄えられることを示した。非対称型閉ループ柔軟カタ

パルトを用いて、200 [mm] の高さ、700 [mm] の飛距離を跳躍することができるコンパクトな跳躍ロボットを提案、製作し実験を行った。筆者らが行った紐状の超柔軟マニピュレータの理論 [22]~[24] を基に、閉ループ構造を持つ弾性体の理論を構築することが今後の課題である。

## 参考文献

- [1] H.C. Bennet-Clark and E.C.A. Lucey: "The jump of the flea: a study of the energetics and a model of the mechanism," *J. Exp. Biol.*, vol.47, pp.59-76, 1967.
- [2] J.H. de Groot and J.L. van Leeuwen: "Evidence for an Elastic Projection Mechanism in the Chameleon Tongue," *Proc. Royal Society of London*, B-271, pp.761-70, 2004.
- [3] U.K. Muller and S. Kranenbarg: "Power at the Tip of the Tongue," *Science*, vol.304, pp.217-219, 2004.
- [4] M.H. Raibert: *Legged Robots That Balance*. The MIT Press, 1986.
- [5] 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.
- [6] 田中, 広瀬: "脚車輪ジャンプロボット Airhopper の開発 第 2 報 車輪推進型跳躍動作の実現", *ロボティクス・メカトロニクス講演会 '06 講演論文集*, 1A1-D28, 2006.
- [7] E. Watari, H. Tsukagoshi, T. Tanaka, D. Kimura and A. Kitagawa: "Development of a Throw and Collect Type Rescue Inspector," *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007)*, pp.2762-2763, 2007.
- [8] A.A.F. Nassiraei, M. Murata, K. Ichikawa and K. Ishii: "Realization of the Rapid Movements for the Entertainment Robots by Using Two New Actuators "Inertia Actuator" and "Cam Charger",", *Proc. ASME IMECE2006*, IMECE2006-14257, p.6 2006.
- [9] A.A.F. Nassiraei, S. Masakado, T. Matsuo, T. Sonoda, I. Takahira, H. Fukushima, M. Murata, K. Ichikawa, K. Ishii and T. Miki: "Development of an Artistic Robot "Jumping Joe",", *Proc. of IEEE IROS'06*, pp.1720-1725, 2006.
- [10] U. Scarfoglio, C. Stefanini and P. Dario: "Design and Development of the Long-Jumping "Grillo" Mini Robot," *Proceeding of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.467-472, 2007.
- [11] 鈴木, 森越, 明賀, 本多, 高信, 三浦: "コロロギ型跳躍ロボットの研究", 第 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 1F26, 2007.
- [12] Y. Sugiyama, A. Shiotsu, M. Yamakita and S. Hirai: "Circular/Spherical Robots for Crawling and Jumping," *Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA05)*, pp.3606-3611, 2005.
- [13] Sandia National Laboratories: <http://www.sandia.gov/media/NewsRel/NR2000/hoppers.htm>
- [14] 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*, pp.1508-1513, 2007.
- [15] A. Yamada, H. Mochiyama and H. Fujimoto: "Kinematics and Statics of Robotic Catapults based on the Closed Elastica," *Proc. of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.3993-3998, 2007.
- [16] 山田, 望山, 藤本: "空間型閉ループ柔軟カタパルト", *ロボティクス・メカトロニクス講演会 '07 講演論文集*, 2P1-A08, 2007.
- [17] V.G.A. Goss, G.H.M. van der Heijden, J.M.T. Thompson and S. Neukirch: "Experiments on Snap Buckling, Hysteresis and Loop Formation in Twisted Rods," *Experimental Mechanics*,



- vol.45, pp.101–111, 2005.
- [18] Y. Miyazaki: “Analytical Solution of Spatial Elastica and Its Application to Kinking Problem,” *Int. J. Solids Structures*, vol.34, no.27, pp.3619–3636, 1997.
- [19] R.M. Murray, Z. Li and S.S. Sastry: *A Mathematical Introduction to ROBOTIC MANIPULATION*. CRC Press, Inc., 1994.
- [20] 山田, 渡, 望山, 藤本: “閉ループ柔軟カタバルトを用いた跳躍ロボット”, 第25回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 3M15, 2007.
- [21] A. Yamada, M. Watari, H. Mochiyama and H. Fujimoto: “A Jumping Robot based on the Closed Elastica,” *Proc. of the MHS2007 & Micro-Nano COE*, pp.604–609, 2007.
- [22] H. Mochiyama and T. Suzuki: “Kinematics and Dynamics of a Cable-like Hyper-flexible Manipulator,” *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA03)*, pp.3672–3677, 2003.
- [23] H. Mochiyama and H. Fujimoto: “Robotic Manipulation of a Hyper-flexible Body,” *Preprints of the 16th IFAC World Congress, Tu-E19-To/6*, p.6, 2005.
- [24] H. Mochiyama and H. Fujimoto: “Damping Manipulation of a Hyper-flexible String-like Robot,” *Preprints of the IFAC 3rd Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Non-linear Control*, pp.221–226, 2006.



山田篤史 (Atsushi Yamada)

2001年名古屋工業大学工学部第II部機械工学科卒業。2003年名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程修了。同年より博士後期課程入学。現在に至る。柔軟物を用いたロボティクスの研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)



渡 正充 (Masamitsu Watari)

2007年名古屋工業大学工学部機械工学科卒業。同年より名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程入学。現在に至る。柔軟物を用いたロボティクスの研究に従事。

(日本ロボット学会学生会員)



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, 日本神経科学学会, IEEE, Society for Neuroscience 会員。博士 (情報科学)。(日本ロボット学会正会員)



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, ものづくりテクノセンター長, 理化学研究所研究員 (併任)。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, 文科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, SICE 中部支部支部長など歴任。日本機械学会フェロー・評議員。

(日本ロボット学会正会員)