

高剛性受動関節を有する閉ループ柔軟カタパルトと 遊泳ロボットへの応用

山田 篤史^{*1} 渡 正充^{*1} 望山 洋^{*2} 藤本 英雄^{*1}

A Robotic Catapult based on the Closed Elastica with a High Stiffness Endpoint and Its Application to Swimming Tasks

Atsushi Yamada^{*1}, Masamitsu Watari^{*1}, Hiromi Mochiyama^{*2} and Hideo Fujimoto^{*1}

In this paper, we propose a new robotic catapult with a high stiffness endpoint. The conventional robotic catapults based on the closed elastica 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 free joint and an active joint, respectively. Here we found that by adding only the high stiffness at the free joint, compared to the conventional type, more elastic energy can be stored and release surely without loss of a characteristic of generating impulsive motion repeatedly. By utilizing the proposed robotic catapult based on the closed elastica with a high stiffness endpoint, we develop a novel swimming robot which can swim not only continuously but briskly from a stationary state.

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

1. はじめに

今日のロボット技術は、ヒューマノイドロボットを6[km/h][30]の速度で走行させることができるまでに発展している。しかし、ロボットの運動は、今なお小形の生物の運動[3]に遠く及ばない。例えば、小形の魚は水中で素早く動き、旋回することができる[4]。カメレオンは、自身の舌を約500[m/s²]、すなわち、重力加速度の50倍もの加速度(50[G])で射出することにより、体長の1.5倍も離れた位置にある獲物を捉えることができる[6][14]。カメレオンなどに見られる特殊な生物的カタパルト機構の存在は、大きな速度というよりはむしろ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。本研究の目的は、上記のような現在のロボット技術では成し得ない、生物のしなやかで俊敏な動作を達成するロボットを実現することである。瞬発的な動作をロボットで実現することは、工学的な興味だけではなく、海底探査のための高い操縦性を備えた遊泳ロボットや、惑星探査のための小型跳躍ロボット、レスキューのための小型の飛翔ロボットなどの有用なアプリケーションをさらに発展させる一助になると

考えられる。

近年、瞬時高加速度運動を行うロボットがいくつか提案されており、様々な研究が行われている。Kanekoらは、最大加速度90.9[G]で、高速で動く目標物体を把持する100[G]キャプチャリングロボットを開発している[7]。Hiroseらの研究グループは、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、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4足歩行ロボットを開発している[8]。Tsukagoshiらは、エネルギー源として圧縮空気を用いることによって、体長約0.25[m]に対して、1.0[m]を越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[28]。これらのロボットはいずれも斬新なアイデアと高度なロボット技術により瞬時高加速度運動を実現している一方で、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。近年、Scarfogliero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[16]。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。Armourらは、柔軟物を用いた跳躍ロボットを提案し、多くの跳躍ロボットとの比較を詳細に行っている[1]。Hiraiらの研究グループは、柔軟物の弾性エネルギーを利用して、体長の3.3倍もの高さまで跳躍することのできる円形・球形柔軟ロボットを開発している[17]。しかし、跳躍準備を整えるまでには30[s]以上を要するので、瞬時高加速度運動の繰り返しは、数ヘルツ程度であっても困難である。MIT

原稿受付 2008年3月5日

^{*1}名古屋工業大学大学院工学研究科

^{*2}筑波大学大学院システム情報工学研究科

^{*1}Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

^{*2}Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

■ 本論文は学術性で評価されました。

Towing Tank のグループは, Robotuna と Robopike という二つの魚型ロボットを開発している. これらのロボットは, サーボモータとばね要素の背骨を利用して, 本体を揺り動かすことで推進力を得ることの優位性を示している. Robotuna は, 同じサイズの剛体を前方に引っ張った場合と比較して, 70% を越える抵抗力を軽減できる. さらに, 最大 75 [deg/s] で旋回を行うことができる生体模倣型の魚型ロボットも存在する [4]. これらのロボットは大きく, 重い, コンパクトなロボットの実現は容易ではない.

筆者らは, 閉ループ柔軟カタパルトと名付けた, 柔軟物の閉ループ構造に基づいた瞬時高加速度運動を生成するためのロボット要素を提案している [12] [19] [23]. このロボットカタパルトは, たわませた带状柔軟物の両端を二つの回転関節に固定した, 弾性体の機械的な閉ループ構造である. 片側の回転関節をゆっくりと前後に駆動するだけで, インパルス状の瞬時高加速度運動を繰り返し生成することができる. 閉ループ柔軟カタパルトは一種のフレキシブルマニピュレータであるが, 先に述べた Hirai らの円形・球形柔軟ロボットを例外として, 柔軟物の閉ループ構造から発現される力学的機能に着目したフレキシブルマニピュレータの研究は皆無である. また, 弾性体のこの種のインパルスの動作は, 飛び移り座屈 (snap-through buckling) として知られているが, 本論文で提案するように, この現象をアクチュエータにより積極的に発生させ, インパルス動作を繰り返し生成するために利用しているロボット技術は例を見ない.

本稿では, 瞬時高加速度運動を繰り返し発生させる特徴を維持したまま, 最大トルク一定の条件下でより大きな弾性エネルギーを蓄え, より大きな瞬時高加速度運動を生成するための新しい閉ループ柔軟カタパルトを提案する. 提案するカタパルトは, 従来のカタパルトの受動回転関節に高剛性を付加するだけの簡便な構造である点が特徴である. しかし, 構造が簡便であるにもかかわらず, 蓄えられる弾性エネルギーとともに, 発生できる瞬時高加速度も飛躍的に向上することを, 数値シミュレーションおよび基礎実験により示す. そして, 提案したロボットカタパルトを用いることで, 飛び移り座屈による瞬時高加速度を利用して, 一定速度の推進はもちろん, 静止状態からの素早い移動が可能な新しいタイプの遊泳ロボットを提案し, 水中のような分布力を受ける環境においても, 提案したロボットカタパルトが効果的に働くことを示す.

2. 高剛性受動関節を用いた閉ループ柔軟カタパルト

Fig. 1 は, これまでに筆者らによって提案された, 柔軟物の平面変形を利用して瞬時高加速度運動を繰り返し生成することができる「片端駆動型」閉ループ柔軟カタパルトの形状遷移図である. 片端駆動型は, 先端の並進位置を固定する運動学的拘束を持つ 1 リンクのフレキシブルマニピュレータである. すなわち, マニピュレータの先端は, 自由駆動の回転関節に固定されている. 根元関節はモータで駆動される能動回転関節である. 能動関節を一定方向にゆっくりと駆動すると, 带状柔軟物は 'S' 字を寝かせた形状 (二次モード) に変形する. 带状柔軟物の変形すると, 弾性エネルギーがゆっくりと蓄えられる. さらに能動関節を回転させると, ある形状で带状柔軟物に飛び移り座屈

Active-passive catapult type

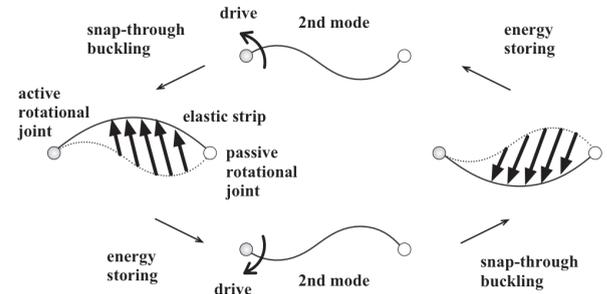


Fig. 1 Shape transitions of planar type robotic catapults based on the closed elastica and its impulsive motions. The shape in the 2nd mode has two extrema

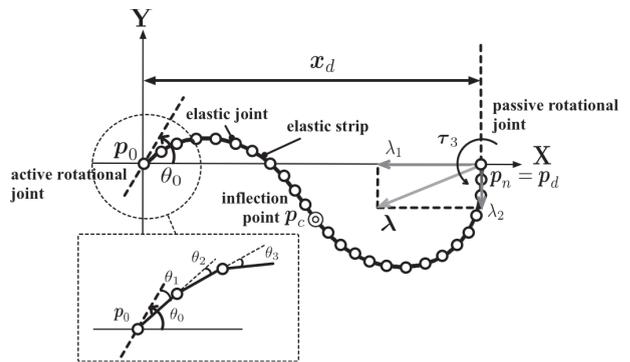


Fig. 2 The relation between shape of the elastic strip and constraint forces of the robotic catapult

が発生し, 瞬時高加速度運動を得ることができる. このとき带状柔軟物は, 蓄えられた弾性エネルギーを急速に放出することで, 'S' 字を寝かせた形状からアーチ形状に急激に変形する. 飛び移り座屈を生じたあとに能動関節を反対向きに駆動することで, 反対向きの瞬時高加速度運動を得ることができるため, 能動関節を往復して駆動するだけで, 特別なトリガ機構を用いることなく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. また, 带状柔軟物を変形させて弾性エネルギーを蓄え, それを飛び移り座屈によって一度に放出できれば大きな加速度を得ることができる. すなわち, 飛び移り座屈の発生は, 能動関節の駆動速度には依存しない [12] ため, 瞬時高加速度運動を得るために能動関節を駆動するアクチュエータに高い回転速度を要求しない.

2.1 静力学

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 [19] citeyamadaRSJ1. i 番目のリンク先端を表す位置ベクトルを $\mathbf{p}_i \in \mathbb{R}^3$, i 番目の関節の姿勢を $\Phi_i \in SO(3)$ [15] で表す ($i = 0, \dots, n$). Φ_i は, 根元関節から $i-1$ 番目の関節までの, 各関節軸まわりの回転行列の積で表される [23]. n はリンク数を表す. 一般性を失うことなく, $\mathbf{p}_0 = \mathbf{0}$ とする. 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 $\lambda_e := [\lambda_1 \lambda_2 \ 0]^T$ と拘束トルク $\tau_e := [0 \ 0 \ \tau_3]^T$ を直鎖先端に印加する. 拘束力 λ_e は条件 $\mathbf{p}_n = \mathbf{p}_d := [x_d \ 0 \ 0]^T$ を, 拘束トルク τ_e は, $\Phi_n = \Phi_d$

を満足するように加えるものとする．仮想仕事の原理より，静力学に関する以下の式が成り立つ．

$$\frac{\partial K^T}{\partial \theta} - \mathbf{J}_b^T \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_e \\ \boldsymbol{\tau}_e \end{bmatrix} = \mathbf{0}, \quad (1)$$

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

$$\boldsymbol{\Phi}_n = \boldsymbol{\Phi}_d, \quad (3)$$

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． $\mathbf{J}_b \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ 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，干渉がないと仮定し，その弾性係数を $k_i (i = 1, \dots, n)$ で表す．このとき，弾性エネルギー K は次式で与えられる．

$$K(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n k_i \theta_i^2, \quad (4)$$

ここで， $\boldsymbol{\theta} := [\theta_1 \dots \theta_n]^T \in \mathbb{R}^n$ は，带状柔軟物を直鎖で近似したときの各仮想関節の角度をまとめたベクトルである． θ_0 は根元関節の基準軸 (Fig. 2 中の点 \mathbf{P}_0 を通る点線) が x 軸となす角度を表す．この基準軸を変化させること，すなわち θ_0 を変化させることが，原点に位置する回転関節をモータで駆動することに対応していることに注意する．式 (1) から，各関節の静力学式は次式で与えられる [19]．

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

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 $\boldsymbol{\tau}_e$ と位置 \mathbf{p}_{i-1} に作用する拘束力 $\boldsymbol{\lambda}_e$ 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 τ_0 は，根元関節の剛性による復元力と等価であるので，

$$\tau_0 = -k_1 \theta_1. \quad (6)$$

が成り立つことに注意する．本稿では，带状柔軟物の初期形状を，トルクの条件 $\tau_0 = 0$ を満足し，すべてのリンクが x 軸よりも上側にある場合とする．

2.2 片端駆動型

筆者らがこれまでに提案した片端駆動型 [19]~[23] では，直鎖先端を固定している関節はフリージョイントであるため， $\boldsymbol{\tau}_e = \mathbf{0}$ が成り立つ．よって，式 (5) と (6) から，第 1 関節に関する釣り合い式は次式で与えられる．

$$\tau_0 = -x_d \lambda_2. \quad (7)$$

一方，带状柔軟物上の変曲点 $\mathbf{p}_c := [x_c \ y_c \ 0]^T$ に関する力の釣り合いは，次式で与えられる．

$$\mathbf{e}_z^T \{(\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_c) \times \boldsymbol{\lambda}_e + \boldsymbol{\tau}_e\} = 0. \quad (8)$$

片端駆動型では $\boldsymbol{\tau}_e = \mathbf{0}$ が成り立つので，拘束条件 (8) は，偏差を表すベクトル $\mathbf{p}_e := \mathbf{p}_n - \mathbf{p}_c$ と拘束力ベクトル $\boldsymbol{\lambda}_e$ との外

積が 0 であることを表す．これは，ベクトル \mathbf{p}_e と $\boldsymbol{\lambda}_e$ が平行であることを意味する．よって，片端駆動型の場合，拘束力ベクトル $\boldsymbol{\lambda}_e$ は，変曲点 \mathbf{p}_c を指し示す．

式 (7) と (8) から，拘束力 λ_2 は初期形状で零であるので，根元関節と手先関節の間には，変曲点は存在しない．带状柔軟物が初期形状を描いている状態で，能動関節を時計回りに駆動すると，式 (7) から $\lambda_2 > 0$ が成り立つので，带状柔軟物上には，少なくとも一つの変曲点が存在する．

2.3 高剛性受動関節の導入

带状柔軟物に，より大きな弾性エネルギーを蓄えることができ，それを運動エネルギーとして一度に放出することができれば，飛び移り座屈で発生する瞬時高加速度はより大きくなる．式 (4) より，带状柔軟物の両端が固定されている場合には，带状柔軟物がより複雑な形状であれば，蓄えられている弾性エネルギーもより大きいことが直感的に分かる．このとき，変曲点の数は，带状柔軟物が複雑な形状をしているか否かの一つの指標になり得ることに注意する．よって，飛び移り座屈が発生する前の带状柔軟物の形状により多くの変曲点が存在するとき，带状柔軟物にはより大きな弾性ポテンシャルエネルギーが蓄えられている可能性が期待できる．

本稿では，飛び移り座屈発生前に，より大きな弾性ポテンシャルエネルギーを带状柔軟物に蓄えるために，带状柔軟物の端点に高剛性の受動関節を導入する．ここで，高剛性とは，带状柔軟物の剛性と比較して，十分高い剛性を意味する．この剛性を極限まで高くすると，受動関節は固定端となる．提案する手法は，固定端に限るものではないが，本稿で実現したロボットは高剛性受動関節として固定端を採用したため，固定端として話を進める．すなわち，高剛性受動関節とは，片端駆動型の带状柔軟物と x 軸のなす角度 θ_{tip} がつねに零になるように，手先位置の拘束トルク τ_3 を印加することを意味する．

式 (5) より，片端駆動型に拘束トルク τ_3 を印加することを考えると，初期形状では次式が成り立つ．

$$\tau_3 = -x_d \lambda_2. \quad (9)$$

式 (9) を (8) に代入すると，次式になる．

$$\mathbf{e}_z^T (\mathbf{p}_c \times \boldsymbol{\lambda}_e) = 0. \quad (10)$$

式 (10) は，変曲点ベクトル \mathbf{p}_c と拘束力ベクトル $\boldsymbol{\lambda}_e$ とが平行であることを表す．よって，式 (9) から，片端駆動型の初期形状において，拘束トルク τ_3 を反時計まわりにわずかに加えることで，変曲点が带状柔軟物の先端付近に表れることが分かる．ゆえに，拘束条件 $\theta_{tip} = 0$ を満足するまで拘束トルク τ_3 を印加すると，带状柔軟物上には変曲点が存在する．よって，高剛性受動関節型は，初期形状では带状柔軟物上に変曲点を持つ．

拘束トルク τ_3 は $\theta_{tip} = 0$ をつねに満たすように加えられているので，初期形状から能動関節をある角度まで時計回りに駆動していくと，带状柔軟物はその端点間距離を 2 等分する垂線に対して線対称の形状になる．带状柔軟物が，この対称形状になったとき，能動関節トルクと拘束トルクに関する条件 $\tau_0 = -\tau_3$ が成り立つので，式 (5) より，拘束力の y 方向成分 λ_2 はつね

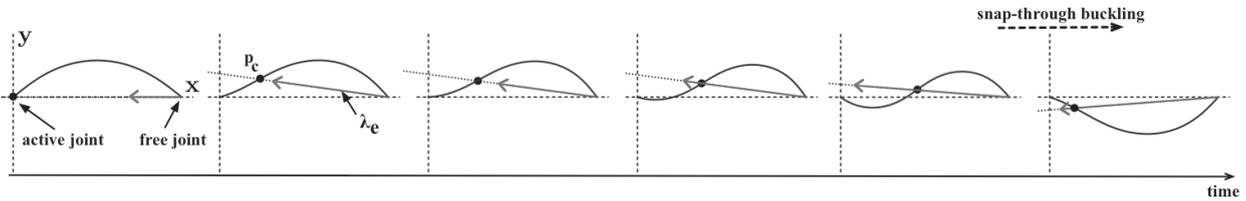


Fig. 3 Stick diagram of the active-passive type

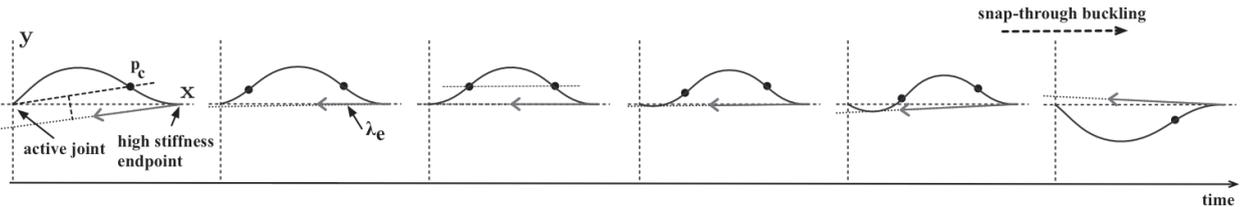


Fig. 4 Stick diagram of the proposed high stiffness endpoint type

に零になることが分かる．よって，変曲点の拘束条件 (8) は，次式で与えられる．

$$\tau_3 = y_c \lambda_1. \quad (11)$$

対称形状の条件から導出された変曲点 y_c のみの拘束条件 (11) は，少なくとも二つの変曲点が零でない同じ y 座標である y_c の位置に存在することを表す．よって，高剛性受動関節型では，带状柔軟物が初期形状を描いている状態から対称形状になるまで，能動関節を時計まわりに駆動することで，少なくとも二つの変曲点が带状柔軟物上に表れる．ゆえに，高剛性受動関節型の带状柔軟物は，飛び移り座屈が発生する前に従来の片端駆動型よりも複雑な形状になり，その結果，より大きな弾性エネルギーを蓄えることができる可能性がある．

3. 数値シミュレーション

带状柔軟物に蓄えられる弾性ポテンシャルエネルギーと根元関節の駆動トルクの変化を示すために，準静的な条件で数値シミュレーションを行う．飛び移り座屈は，アクチュエータの駆動速度に依存しないので，準静的な条件でもその特性が失われないことに注意する．シミュレーションには，以下に示す式 (5) の漸化式表現を用いる．

$$\theta_1 = \frac{1}{k_1} e_Z^T \{ \mathbf{p}_n \times \boldsymbol{\lambda}_e + \boldsymbol{\tau}_e \}, \quad (12)$$

$$\theta_{i+1} = \theta_i - \frac{1}{k_{i+1}} e_Z^T \{ (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{i-1}) \times \boldsymbol{\lambda}_e \}, \quad (i = 1, \dots, n). \quad (13)$$

式 (12), (13) を用いることで，直鎖の形状とそのときの拘束力ベクトルを求める．なお，漸化式はニュートン法 [18] により解を求める．

数値シミュレーションを用いて求めた従来の片端駆動型と，提案する高剛性受動関節型の带状柔軟物の変形形状を表すスティック線図を Fig. 3, Fig. 4 にそれぞれ示す．带状柔軟物の形状は一樣剛性の場合，弾性係数 k_i に依存しない [19] [23] ことに注意する．

片端駆動型では，拘束力ベクトルは変曲点をつねに指し示し，

飛び移り座屈が発生するまでに，一つの変曲点が存在することが分かる．一方，高剛性受動関節型では，初期形状において位置ベクトル \mathbf{p}_c と拘束力ベクトル $\boldsymbol{\lambda}_e$ が平行であり，初期形状を除くと，飛び移り座屈が発生するまでに带状柔軟物上に二つの変曲点が存在することが分かる．

能動関節の駆動トルクと弾性ポテンシャルエネルギーの変化を Fig. 5, Fig. 6 にそれぞれ示す．シミュレーションパラメータは，リンクの自由度 $n = 30$ ，両端点間距離 $x_d = 0.257$ [m]，それぞれのリンク長さを $l = 0.0102$ [m] とした．带状柔軟物の剛性は一樣と仮定するが，端点条件を考慮し [29]，片端駆動型 1 および高剛性受動関節型の弾性係数については， $k_1 = k_{30} = 2.049$ [Nm/rad]，その他の関節は $k_i = 1.025$ [Nm/rad]，片端駆動型 2 の弾性係数については， $k_1 = k_{30} = 2.688$ [Nm/rad]，その他の関節は $k = 1.344$ [Nm/rad] とした．片端駆動型 2 の弾性係数は，能動関節の最大駆動トルクの絶対値が高剛性受動関節型と等しくなるように設定した．シミュレーション結果より，高剛性受動関節型では，初期形状から蓄えられる弾性エネルギーは，片端駆動型 1 よりも約 39.5% 大きく，片端駆動型 2 よりも約 8.8% 大きい結果が得られた．よって，带状柔軟物の先端を固定した受動関節に高剛性を付加するだけで，带状柔軟物の剛性が等しい場合はもちろん，能動関節の最大駆動トルク一定条件の下でさえ，より大きな弾性エネルギーを带状柔軟物に蓄えることができる．

一方，高剛性受動関節型の駆動トルクの最大値は，片端駆動型 1 の最大値と比較して約 27.9% 大きかった．よって，高剛性受動関節型の带状柔軟物に蓄えられた弾性エネルギーの増加量は，駆動トルクの最大値の増加量よりも大きいことが分かる．この結果は，閉ループ柔軟カタパルトが本質的に持つ駆動トルクと带状柔軟物の変形形状との関係の非線形性によるものと考えられる．

4. 基礎実験

次に，基礎実験を行い，実際の带状柔軟物の変形形状および生成される加速度を調べる．Fig. 7 に実験装置を示す．

実験装置は，アクチュエータによって駆動される能動回転関

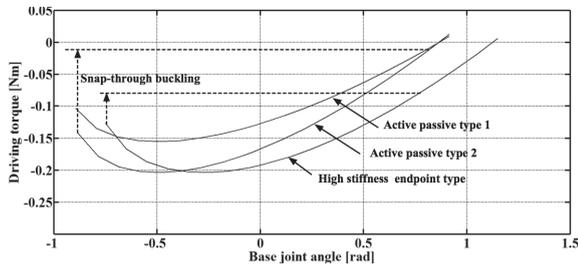


Fig. 5 Change of the driving torque

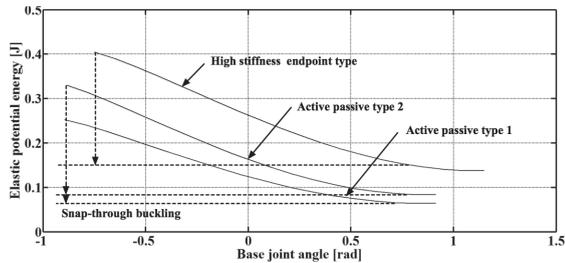


Fig. 6 Change of the elastic potential energy

節と受動関節およびマーカを取り付けた带状柔軟物から構成される。アクチュエータは、最大トルク 0.531 [Nm] の RC サーボモータ (RB303d, MiniStudio Inc., Japan) を使用する。能動回転関節の回転軸と受動関節の固定軸間の距離は 257 [mm] とする。マーカは、带状柔軟物の変形を邪魔しない程度の十分細かい針を使用した市販の待ち針を用いる。その待ち針を、带状柔軟物の側面に 30 点取り付ける。带状柔軟物は、厚さ × 幅 × 長さが $0.50 \times 5.0 \times 305$ [mm] である焼入れ済み帯鋼 JIS G3311 (通称：焼入れリボン鋼) を用いる。

測定は、能動関節を駆動したときの带状柔軟物の変形形状を高速度カメラで撮影することで行う。撮影した映像から、画像解析ソフトを用いてそれぞれのマーカの位置を計測し、変形形状を得る。なお、能動関節の駆動回転軸は、床面に対して垂直になるように設置したので、带状柔軟物の変形形状は重力の影響を受けない。

Fig. 8 に、式 (12), (13) を用いたシミュレーション結果および実験による带状柔軟物の変形形状を示す。実線はシミュレーション結果、点線は実験値を表す。初期形状からの変化が大きいほど、実験値と計算値との差は大きくなる。特に受動関節付近で大きくなっていることが分かる。しかし、実験値と計算結果は比較的良好に一致しているといえる。よって、実験では計測が容易ではない、带状柔軟物に蓄えられる弾性エネルギーや駆動トルクの変化については、Fig. 5, Fig. 6 に示した数値シミュレーション結果から判断するのは妥当だと考えられる。

次に、飛び移り座屈により生成される加速度の大きさを調べる。本稿で提案したタイプの閉ループ柔軟カタパルトは、Fig. 3, Fig. 4 に示したように、飛び移り座屈が発生する直前および直後の带状柔軟物の形状が、従来型と比較して大きく異なることが分かる。そのため、十分な加速度を得るために、蓄えられた大きな弾性エネルギーを従来型と同様に一度に解放できているかを調べる。そこで、Fig. 7 に示すように、带状柔軟物に取り

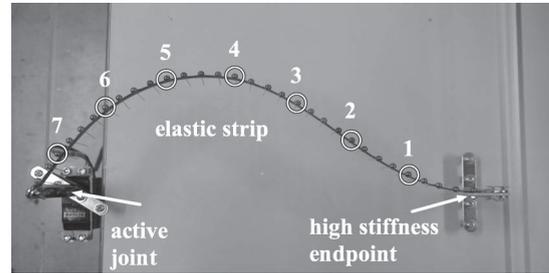


Fig. 7 Markers on the elastic strip

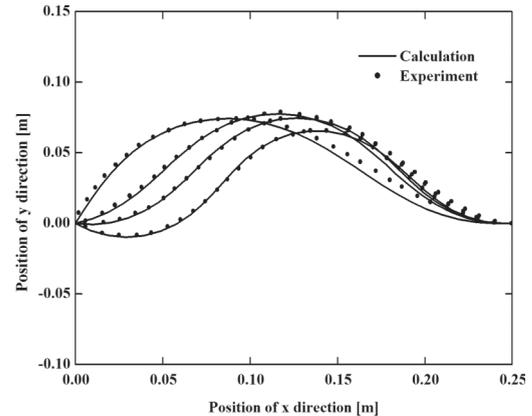


Fig. 8 Computed and measured shapes of the elastic strip

付けたマーカのうち代表的な 7 点の加速度を調べる。

片端駆動型を用いたときの飛び移り座屈発生前後のマーカの加速度変化を Fig. 9 に、飛び移り座屈が発生したときの時刻を拡大した図を Fig. 10 にそれぞれ示す。また、高剛性受動関節型を用いたときの飛び移り座屈発生前後のマーカの加速度変化を Fig. 11 に、飛び移り座屈が発生したときの時刻を拡大した図を Fig. 12 にそれぞれ示す。Table 1 に、それぞれのタイプに取り付けたマーカの加速度の最大値を示す。従来型と比較すると、提案型では、両端点付近のマーカを除いたすべてのマーカの加速度の最大値が大きくなっていることが分かる。また、どちらのタイプでも、飛び移り座屈直前の変形形状において、受動関節に近いほうに表れる変曲点付近の加速度の最大値が一番大きいという結果が得られた。

一方、加速度が急激に変化する時刻に注目すると、Fig. 10, Fig. 12 より、どちらのタイプでも、各マーカの加速度が最大値を示す時刻にそれほど差がないことが分かる。よって、従来型と比較して、飛び移り座屈発生前に変曲点が多くより複雑な形状になる提案型でも、蓄えた弾性エネルギーを一度に解放できていることが分かる。

二つのタイプの最大加速度を比較すると、高剛性受動関節型は、片端駆動型よりも約 54% 大きい加速度を記録している。一方、前章の数値計算結果では、同じ弾性係数を用いた場合、高剛性受動関節型は片端駆動型と比較して約 39.5% 大きい弾性エネルギーを蓄えることができた。よって、飛び移り座屈直前の高剛性受動関節型の带状柔軟物の形状は、従来型に比べて、蓄えた弾性エネルギーを一度に解放しやすい形状であると考えられることができる。

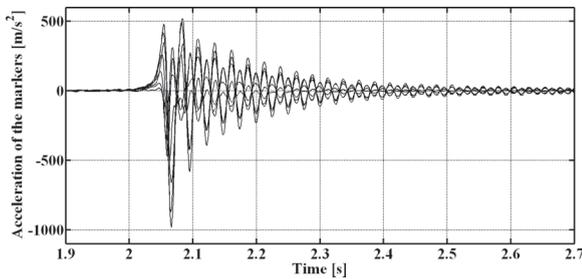


Fig. 9 Acceleration of the markers attached to the elastic strip of the conventional active-passive type

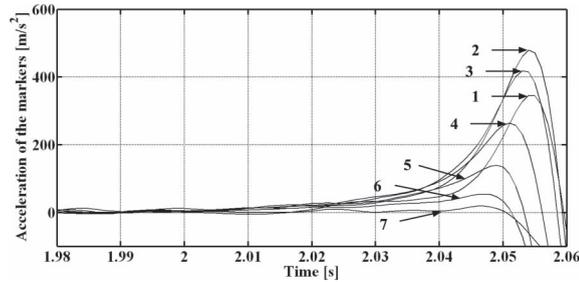


Fig. 10 Acceleration of the markers attached to the elastic strip of the conventional active-passive type at snap-through buckling

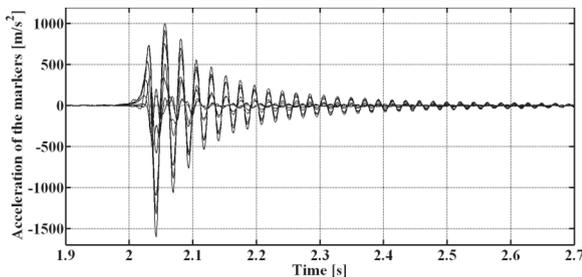


Fig. 11 Acceleration of the markers attached to the elastic strip of the high stiffness endpoint type

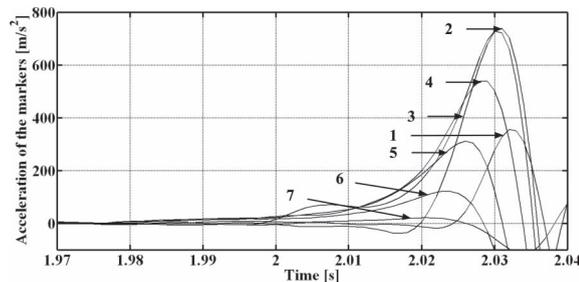


Fig. 12 Acceleration of the markers attached to the elastic strip of the high stiffness endpoint type at snap-through buckling

これらの結果から、提案する高剛性受動関節型は、駆動トルクの最大値が一定の条件下においても、带状柔軟物を従来型と比較してより複雑な形状に変形させることで大きな弾性エネルギーを蓄えることができ、飛び移り座屈直前の変形形状が、蓄えた弾性エネルギーを一度に解放しやすいため、より大きな瞬時高加速度を生成することができるといえる。

Table 1 Maximum acceleration of each marker

marker	a.-p. type	high stiffness type	magnification
1	350 [m/s ²]	350 [m/s ²]	1.0
2	480 [m/s ²]	740 [m/s ²]	1.54
3	420 [m/s ²]	730 [m/s ²]	1.74
4	260 [m/s ²]	530 [m/s ²]	2.04
5	130 [m/s ²]	310 [m/s ²]	2.07
6	50 [m/s ²]	120 [m/s ²]	2.40
7	20 [m/s ²]	20 [m/s ²]	1.0

5. 閉ループ柔軟カタパルトを用いた瞬時高加速度遊泳ロボット

提案した高剛性受動関節を有する閉ループ柔軟カタパルトは、瞬時高加速度運動を繰り返し生成することができるので、自立型ロボットの推進機構として用いることができる。本稿では、閉ループ柔軟カタパルトを自立型の遊泳ロボットに適用する [12] [13] [21] [26]。Fig. 13 に、提案する遊泳ロボットの正面図および下面図を示す。遊泳ロボットは、EPS プレートに固定した木製のフレームに、アクチュエータと高剛性受動関節を取り付け、アクチュエータは能動回転関節に接続されている。高剛性受動関節を有する閉ループ柔軟カタパルトは、本体下部に取り付けられている。アクチュエータは、最大トルク 0.531 [Nm] の RC サーボモータ (RB303d, MiniStudio Inc., Japan) を使用する。能動回転関節と受動関節の固定軸間の距離は 257 [mm] とする。带状柔軟物は、厚さ × 幅 × 長さが 0.50 × 5.0 × 305 [mm] である焼入れ済み帯鋼 JIS G3311 (通称: 焼入れりボン鋼) を用いる。带状柔軟物には、水を掻くためのフィンが直接固定されている。フィンは、厚さ × 幅 × 長さが 1 [mm] × 70 [mm] × 105 [mm] の柔軟なアクリル部材を用いている。コントローラと駆動源として、PIC マイクロコンピュータ (12F675), 9 [V] ドライセルバッテリーをそれぞれ用いる。ロボットの諸元を Table 2 に示す。

5.1 フィン

閉ループ柔軟カタパルトを推進力の生成装置として捉え、より大きな力を推進方向に発生することが重要になる。そこで、Table 2 に示した幅の小さい带状柔軟物に直接フィンを固定することで、带状柔軟物自体ではなく、面積の大きいフィンの部分で、水を効果的に推進方向に押し出す構造を採用する。このため、带状柔軟物の高加速度運動はフィンによって水を掻く運動に直接使われる。水圧を受けている状況では、带状柔軟物の飛び移り座屈により発生した大きな運動量すべてがフィンに伝達されない、大きな推進力を得るには、飛び移り座屈により生成される加速度が大きい位置に水掻き用のフィンを固定することが重要になる。それに加えて、推進するためには水を掻く方向もまた重要である。Fig. 10, Fig. 12 に示した結果を用いて試行錯誤を行い、加速度が大きく、所望の方向に推進力が得られる位置にフィンを取り付けた。最終的に、フィンは能動回転関節から 137 [mm] 離れた位置に固定した。

5.2 水中における瞬時高加速度運動

次に、基礎実験を行い、带状柔軟物の飛び移り座屈により水中で生成される加速度を調べた。Fig. 14 に実験装置を示す。

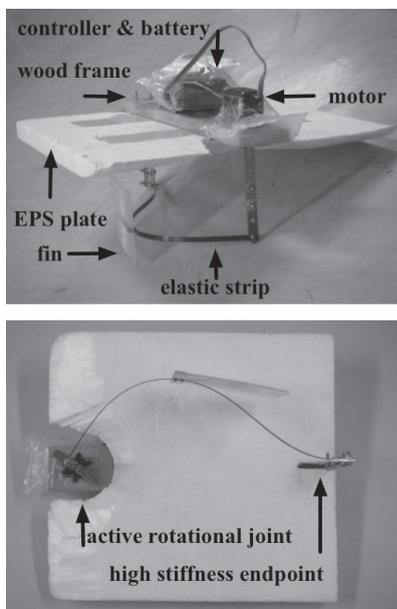


Fig. 13 Front and bottom views of the impulsive swimming robot

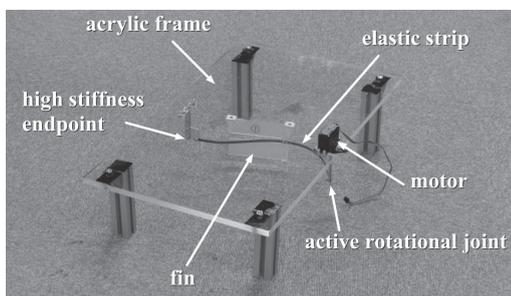


Fig. 14 Experimental system of fin motion

Table 2 Parameters of the impulsive swimming robot

parameter	value	unit
Body Length	300	[mm]
Weight	0.32	[kg]
Driving Freq.	1.0	[Hz]
Elastic strip length	305	[mm]
Elastic strip width	5.0	[mm]
Elastic strip thickness	0.50	[mm]
Distance between the two joints	257	[mm]

実験装置として、遊泳ロボットに搭載した高剛性受動関節を有する閉ループ柔軟カタパルトを固定した、アクリルボードデスクを製作した。フィンの両端点にはマークを取り付ける。

測定は、この実験装置を、带状柔軟物およびフィンが水中に沈んだ状態になるように水上に設置し、能動関節を駆動したときの水中での带状柔軟物の変形形状を高速度カメラで撮影することで行う。撮影した映像から、画像解析ソフトを用いてフィンの両端のマークの位置を計測し、変形形状を得る。

Fig. 15 に、実験によって得られた水中での带状柔軟物およびフィンの動きを示す。带状柔軟物は、水中においても、空気中と同様の変形形状を示していることが分かる。フィンに関しては、座屈直前に水平軸となす角度が大きくなり、その後

飛び移り座屈によって水を素早く受動関節側の斜め後方に押し出す動作が観察できた。これを上下に繰り返すことで、水中においても繰り返し瞬時的な水掻き運動が観察された。Fig. 16 に、フィンを取り付けなかった場合の高剛性受動関節型により生成される加速度の変化を示す。図には、Fig. 7 に示したマーク番号のうち、大きな加速度変化があった点のみを記した。図より、水中では、高い加速度を示すマークは空気中の場合と同様に受動関節側に集中している。しかし、加速度の最大値が大きいマークの順序は、多少異なる。水中では、得られる加速度の最大値が空気中と比較して1/5程度になっていることが分かる。また、加速度が生成される時刻は、空気中での場合と比較すると、带状柔軟物の位置によってずれがあることが分かる。Fig. 17 に、フィンを取り付けた場合の加速度変化を示す。図中の番号は、Fig. 15 に示した、フィンの両端に固定したマークの番号に対応する。図より、フィンを取り付けた場合には、加速度はさらに小さくなっている。これは、フィンは带状柔軟物と比較すると水の抵抗を受ける面積が大きいためであると考えられる。しかし、フィンを取り付けた場合でも重力加速度の約3倍 (3[G]) の加速度が生成されていることが分かる。

5.3 遊泳動作

Fig. 18 に、提案したロボットの瞬時高加速度を伴う遊泳動作を示す。図は、0.5[s] ごとのロボットの位置を表す。

提案したロボットは、柔軟物の飛び移り座屈により繰り返し生成される瞬時高加速度を推進に利用しているため、キビキビと上下に動きながら推進する、ユニークな運動をしているのが分かる。また、この図から、遊泳ロボットは1[体長/s]以上の速度で移動できることが分かる。Fig. 19 に、従来の片端駆動型および提案した高剛性受動関節を有する閉ループ柔軟カタパルトを用いたロボットの遊泳方向の移動距離と横方向変位の時間グラフを示す。この結果は、遊泳ロボットに添付したマークの位置を記録して作成した。図より、二つのタイプの遊泳動作自体にはほとんど違いがないことが分かる。しかしながら、二つのタイプの移動距離はまったく異なる。高剛性受動関節型の平均速度は、片端駆動型を用いたタイプ[12][13]と比べて約16%速い結果となった。高剛性受動関節型を用いた遊泳ロボットの平均速度は約0.43[m/s]を記録した。

5.4 発進運動

提案した遊泳ロボットは、瞬時高加速度を利用して推進するため、静止した状態から、わずかな時間で大きな変位を得ることが出来る。Fig. 19 から分かるように、動き始めた直後からロボットは一定速度になっていることが分かる。Fig. 20 に静止状態からの遊泳ロボットの速度変化を示す。水平の点線は平均速度の10%と90%の値を示す。図より、二つの値の間は約100[ms]であることが読み取れる。この結果から、提案したロボットは、静止状態した状態からでも、瞬時高加速度運動を伴う推進力によって素早い移動ができるといえる。また、この遊泳ロボットを用いて、直進動作だけでなく、その場での旋回動作、それらの動作を組み合わせた進行方向の変更を伴う直進動作を実現している[25][27]。

本稿で提案した遊泳ロボットは、带状柔軟物の機械的な閉ループ構造から生成される飛び移り座屈によって繰り返し生成され

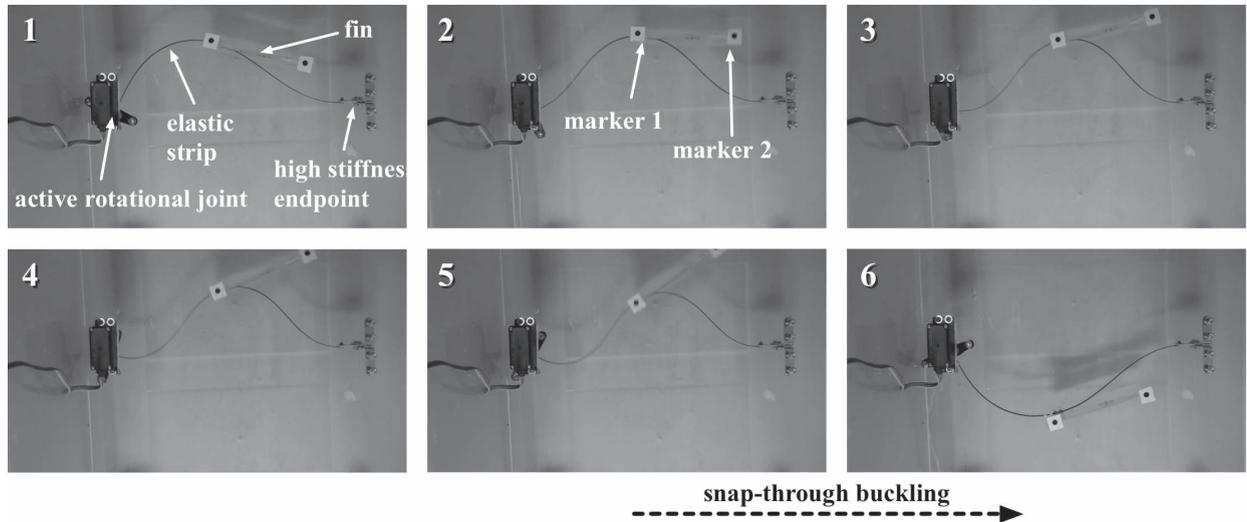


Fig. 15 Fin motion in water recorded by high-speed camera

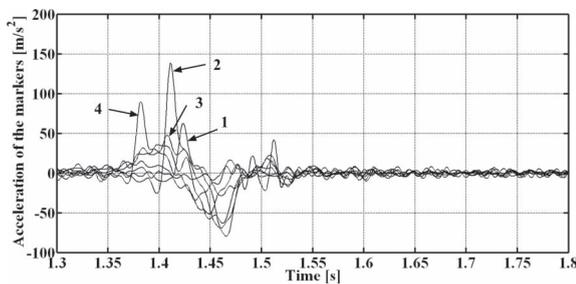


Fig. 16 Acceleration of the markers attached to the elastic strip of the high stiffness endpoint type in water

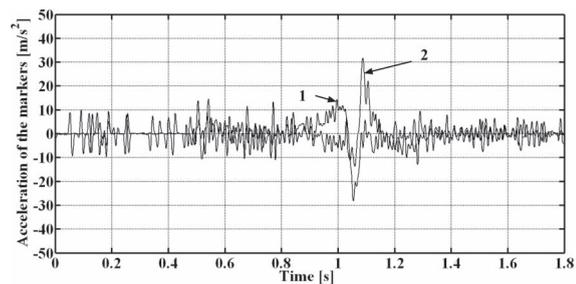


Fig. 17 Acceleration of the markers attached to the fin of the high stiffness endpoint type in water

る瞬時高加速度運動を、推進力として利用するユニークな構造を採用している。そのため、従来の遊泳ロボットと異なり、静止した状態から素早く定常速度まで達するのが大きな特徴である。定常速度に達してからも、これまでのロボットにはないキビキビとしたユニークな遊泳動作を実現している。また、瞬時高加速度運動を利用したフィンの動きで水を掻く動作を繰り返すために、スクリュタイプ推進機構と異なり、水中に水草や浮遊物がある環境でも、それらに推進力を減衰させられることがほとんどないことを、実験により確認している。飛び移り座屈によって生成される瞬時高加速度の大きさは、アクチュエータの駆動速度には無関係である [23]。そのため、従来の遊泳ロボットと異なり、粘性の大きい環境でも、ギャ比の大きなアク

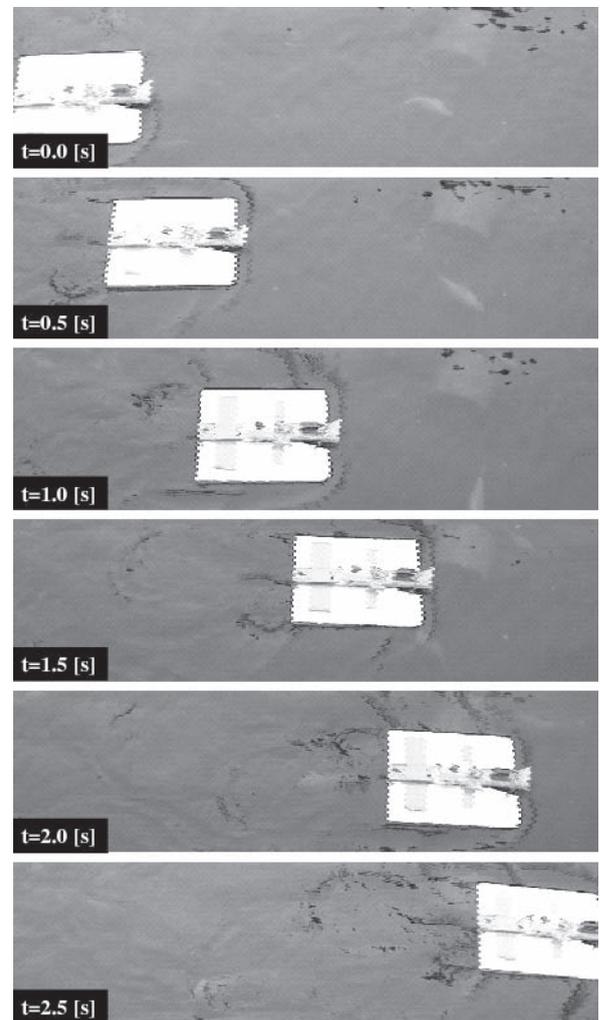


Fig. 18 Swimming motion of the impulsive robot

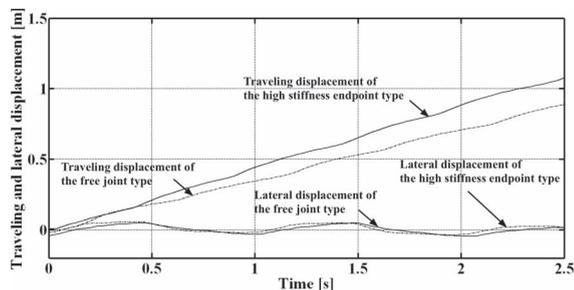


Fig. 19 Traveling and lateral displacement of the impulsive swimming robot

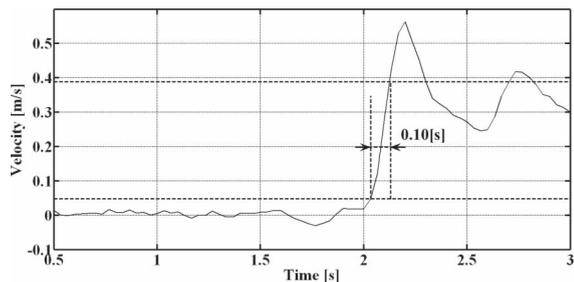


Fig. 20 Change of the velocity of the impulsive swimming robot from stationary state

チュエータを用いて推進できることが期待できる。提案した高剛性受動関節を有する閉ループ柔軟カタパルトは、他の瞬発力の特徴とするロボットの構造よりも部品点数も少なく簡便であるため、これまでに提案されている遊泳タイプのロボットと比較して、小型・軽量の遊泳ロボットが実現しやすい点も大きな特徴となっている。

6. おわりに

本稿では、瞬時高加速度運動を繰り返し発生させる特徴を維持したまま、最大トルク一定の条件下でより大きな弾性エネルギーを蓄え、より大きな瞬時高加速度運動を生成するための新しい閉ループ柔軟カタパルトを提案した。提案したカタパルトは、従来のカタパルトの受動回転関節に高剛性を付加するだけの簡便な構造であるにもかかわらず、蓄えられる弾性エネルギーとともに、発生できる瞬時高加速度も飛躍的に向上することを、数値シミュレーションおよび基礎実験により示した。そして、提案したロボットカタパルトを用いて、飛び移り座屈による瞬時高加速度を利用することで静止状態からの素早い移動が可能な新しいタイプの遊泳ロボットを提案し、水中のような分布力を受ける環境においても、提案したロボットカタパルトが有効に働くことを示した。エネルギー効率やデザインの最適化などのより精巧な解析は今後の重要な課題である。それらの課題のために、連続体である紐状の超柔軟マニピュレータの理論 [9]~[11] を基に、閉ループ構造を持つ弾性体から生まれる力学的機能に着目した理論を構築することが重要な課題である。

謝辞 本研究は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (B) (課題番号 20760159) による成果の一部である。

参考文献

- [1] R. Armour, K. Paskins, A. Bowyer, J. Vincent and W. Megill: "Jumping robot: a biomimetic solution to locomotion across rough terrain," *Bioinspiration & Biomimetics*, pp. s65-s82, 2007.
- [2] D.S. Barrett, M.S. Triantafyllou, Yue DKP, et al.: "Drag reduction in fish-like locomotion," *J Fluid Mech*, vol.392, pp.183-212, 1999.
- [3] 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.*, 47, pp.59-76, 1967.
- [4] F. Fish: "Limits of nature and advances of technology: What does biomimetics have to offer to aquatic robots?," *Applied Bionics and Biomechanics*, vol.3, no.1, pp.49-60, 2006.
- [5] 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.
- [6] 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.761-770, 2004.
- [7] M. Kaneko, M. Higashimori, R. Takenaka, A. Namiki and M. Ishikawa: "The 100G Capturing Robot—Too Fast to See—," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol.8, no.1, pp.37-44, 2003.
- [8] 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*, pp.3378-3383, 2003.
- [9] 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*, pp.3672-3677, 2003.
- [10] H. Mochiyama and H. Fujimoto: "Robotic Manipulation of a Hyper-flexible Body," *Preprints of the 16th IFAC World Congress*, Tu-E19-To/6, 2005.
- [11] 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.
- [12] H. Mochiyama, M. Watari and H. Fujimoto: "A Robotic Catapult based on the Closed Elasticity and Its Application to Robotic Tasks," *Proc. of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1508-1513, 2007.
- [13] 望山洋, 江崎寛幸, 渡正充, 藤本英雄: "閉ループ柔軟カタパルトによるインパルス型遊泳ロボット", *ロボティクス・メカトロニクス講演会*, 2P1-A09, 2007.
- [14] U.K. Muller and S. Kranenbarg: *Power at the Tip of the Tongue*, *Science*, vol.307, pp.217-219, 2004.
- [15] R.M. Murray, Z. Li and S.S. Sastry: *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, 1994.
- [16] U. Scarfogliero, 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.
- [17] 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*, pp.3606-3611, 2005.
- [18] W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky and W.T. Vetterling: *NUMERICAL RECIPES in C*. Cambridge University Press, 1988.
- [19] A. Yamada, H. Mochiyama and H. Fujimoto: "Kinematics and Statics of Robotic Catapults based on the Closed Elasticity,"

- Proc. of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3993–3998, 2007.
- [20] A. Yamada, M. Watari, H. Mochiyama and H. Fujimoto: “An Asymmetric Robotic Catapult based on the Closed Elastica for Jumping Robot,” Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.232–237, 2008.
- [21] A. Yamada, M. Watari, H. Mochiyama and H. Fujimoto: “A Robotic Catapult based on the Closed Elastica with a High Stiffness Endpoint and Its Application to Swimming Tasks,” Proc. of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1477–1482, 2008.
- [22] A. Yamada, M. Watari, H. Mochiyama and H. Fujimoto: “A Robotic Catapult Based on the Closed Elastica with an Anisotropic Stiffness Point and Its Application to Compact Jumping Robots,” Proc. of the 11th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2008), pp.397–404, 2008.
- [23] 山田篤史, 望山洋, 藤本英雄: “閉ループ柔軟カタパルトの静力学解析”, 日本ロボット学会誌, vol.26, no.2, pp.169–177, 2008.
- [24] 山田篤史, 渡正充, 望山洋, 藤本英雄: “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”, 日本ロボット学会誌, vol.26, no.4, pp.363–371, 2008.
- [25] M. Watari, A. Yamada, H. Mochiyama and H. Fujimoto: “A Robotic Catapult based on the Closed Elastica with a High Stiffness Endpoint and Its Application to Impulsive Swimming Robot,” Proc. of the 11th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2008), pp.389–396, 2008.
- [26] 渡正充, 山田篤史, 望山洋, 藤本英雄: “高剛性受動関節を有する閉ループ柔軟カタパルトと遊泳ロボットへの応用”, ロボティクス・メカトロニクス講演会’08, 2008.
- [27] 渡正充, 望山洋, 藤本英雄: “閉ループ柔軟カタパルトを利用した遊泳ロボット—腕ふり型カタパルトの解析と旋回運動の実現—”, 第25回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 3M14, 2007.
- [28] 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, 2007.
- [29] 吉田和司, 河内正隆: “軟質媒体の変形挙動解析 (第1報, 紙葉類のばね-質量梁モデルの検討)”, 日本機械学会論文集 (A編), vol.58, no.552, pp.1474–1480, 1992.
- [30] <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>



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。2008年名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻博士後期課程修了。同年同大学特任助教。現在に至る。柔軟物を用いたロボティクスの研究に従事。Best Paper Award in

the category of “Support Technologies for Mobile Machines,” the 11th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2008) 受賞。計測自動制御学会, IEEE 会員。博士 (工学)。

(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, 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)



渡正充 (Masamitsu Watari)

2007年名古屋工業大学工学部機械工学科卒業。2009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, 株式会社豊田自動織機に入社。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会長, SICE 中部支部支部長, 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)