

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360097

研究課題名(和文) レオロジー特性を有する柔軟対象物の非把持ダイナミックマニピュレーション

研究課題名(英文) Nonprehensile Dynamic Manipulation of Deformable Object with Rheology Characteristics

研究代表者

東森 充 (Higashimori, Mitsuru)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30346522

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、プレートを用いた非把持形態による柔軟物体の伸縮マニピュレーションについて議論した。はじめに、伸縮変形操作の基本原理を実験的に確認し、簡易解析モデルとして、2自由度プレートと2質点で構成される対象物の1次元変形モデルを構築した。次に、プレートの角加速度振幅に対する対象物の挙動変化を整理し、6つの無次元境界振幅によって、2質点の挙動とこれらを組み合わせた対象物全体の変形挙動が支配されることを明らかにした。最後に、シミュレーション解析により、対象物の変形速度を最大化するための最適角速度振幅が、無次元境界振幅のいずれか1つによって規定されることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This work studied a dynamic nonprehensile manipulation of a deformable object, where the shape of a deformable object is controlled by using the plate's rapid vibration. After experimentally confirming the feasibility of the manipulation principle, we introduced a simplified analytical model where a deformable object is modeled by two mass points and the plate has two degrees of freedom. Using this model, we investigated how the object's behavior changes with respect to the amplitude of the rotational angular acceleration of the plate. We showed that the behaviors of the mass points and the whole object are governed by the six non-dimensional boundary amplitudes. Through simulation analysis, we then revealed that the optimal plate's motion leading to the maximal deformation velocity is provided by one of the six boundary amplitudes.

研究分野：ロボット工学, 知能機械学, ロボットマニピュレーション

キーワード：ダイナミックマニピュレーション 非把持マニピュレーション 柔軟物体 レオロジー特性 変形制御

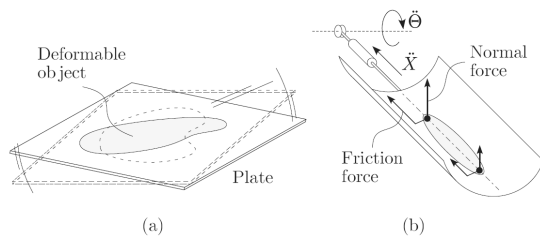


図1 プレートによる変形マニピュレーション

1. 研究開始当初の背景

ロボットによる物体マニピュレーションを、ハンドやグリップを用いた把持形態による研究とプレートやプローブを用いた非把持形態による研究に大別して考えると、一般に、前者では器用性や正確性が、後者では簡便性や高速性が期待される。従来の非把持形態によるマニピュレーションの研究では、対象物を単一質点と見なすか、剛体として取り扱っている。これは、柔軟物体の動的な操りにおける幾何学および力学的解析の見通しの悪さに起因しているものと想定される。しかしながら、非把持形態は、対象物を掴む／摘むことがないため、応力集中による物体破壊を誘発しにくいという利点を有している。したがって、食品や生体組織などデリケートな柔軟物体の操作に適している。このような柔軟物体は、外力に対する弾性変形（一時変形）と塑性変形（永久変形）の両方が同時に生じるレオロジー特性を有する。対象物の最終形状を司るのは塑性変形であり、これを非把持形態によって管理する手法については、従来議論されていない。

2. 研究の目的

本研究では、非把持形態による柔軟物体の操作に踏み込み、図1(a)に示すようなプレートの高速振動を利用した面状柔軟物体の伸縮変形マニピュレーションを提案する。エンドエフェクタとなるプレート上に置かれた対象物の塑性変形を誘発するために十分なプレート運動自由度構成およびその軌道を示す。プレートに対する対象物の滑りと浮き上がりの両方を許容し、変形現象を支配する本質的なパラメータを明らかにした上で、伸縮変形速度を最大化するような最適プレート運動の獲得手法を確立する。

3. 研究の方法

- ① 基本アイデアの実験的考察：  
プレートの高速振動を用いた非把持伸縮マニピュレーションの基本原理を実験により確認する。対象物挙動を解析し、動力学解析モデル構築に向けた手掛かりを掴む。
- ② 解析モデルの構築：  
2質点と1つのダンパから成る1次元変形対象物、および2自由度プレートによって構成される簡易動力学解析モデルを構築する。
- ③ 対象物挙動を支配するパラメータ抽出：  
プレート角加速度に対する対象物の変形挙動の遷移について整理する。質点の挙動を

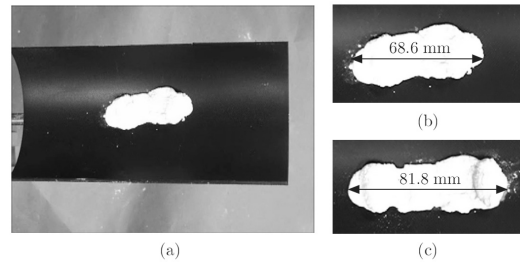


図2 基礎実験の様子

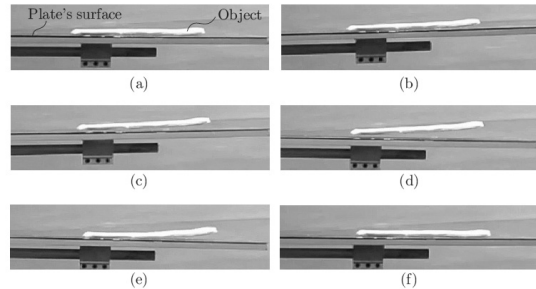


図3 対象物の変形挙動

切り替える境界振幅について調べ、無次元化することにより、変形現象を支配する本質的な物理パラメータを明らかにする。

④ シミュレーション実験：

シミュレーションにより、無次元境界振幅によって対象物の変形速度がどのように変化するかを調べ、変形速度を最大化する最適振幅の獲得手順を確立する。

4. 研究成果

①伸縮マニピュレーションの実験的考察

図1(b)に1次元伸縮変形操作の基本原則を示す。均質な面状柔軟物体と並進 $x$ と回転 $\theta$ の2自由度を有するプレートを考える。ただし、プレートの回転軸は、水平で並進軸と直交する。プレートに角加速度 $\ddot{\theta}$ を与えると、対象物に作用する鉛直方向の慣性力は回転軸からの距離に比例するため、並進軸に沿った垂直抗力の分布に傾斜が生じる。さらに、並進加速度 $\ddot{x}$ をプレートに加えると、対象物に同方向の摩擦力が作用する。垂直抗力の分布に従って摩擦力の分布にも同様な傾斜が生じるため、対象物はプレートの並進軸に沿って伸縮する。対象物の伸縮の向き（伸長あるいは収縮）は、プレート加速度 $\ddot{x}$ および $\ddot{\theta}$ の方向により決定し、 $\ddot{x}\ddot{\theta} > 0$ のときは伸長し、 $\ddot{x}\ddot{\theta} < 0$ のときは収縮する。図2に実験例を示す。対象物を並進軸付近に拘束するため、半円筒形プレートを使用した。柔軟物体として小麦粉を水で練ったものを使用した。図2(b)に示す初期状態において、対象物の長さは68.6[mm]であった。プレートに $\ddot{x}\ddot{\theta} \geq 0$ を満足する正弦波運動を与えることで、対象物は連続的に伸長した。図2(b)に20秒間の操作を実行した後の対象物を示す。対象物は最終的に81.8[mm]まで伸長した。図3に、対象物挙動1周期分を側面から観測した様子を示す。(a)では、プレート表面に対して対象物が全面接触している。その後、プレートが

時計回りに振り降ろされる際に、(b)(c)に示すように回転軸から遠い対象物右側から次第に浮き上がり始め、(d)のように対象物全体が浮き上がった状態が生成される。続いて、プレートが半時計回りに振り上げられる際に、(e)に示すように対象物の左側から再び接触し、最終的に(f)のように全面接触状態に戻っている。

## ②解析モデルの構築

### 2.1. 簡易解析モデル

図3に示すように屈曲変形は十分に微小であり、対象物の側面形状は直線近似可能とみなせる。この点に着目し、対象物とプレートとの接触状態変化の本質（全面接触、部分接触（一部浮き上がり）、非接触（全体浮き上がり））を表現可能な範囲でできるだけモデルを単純化するという立場に立ち、2質点簡易解析モデルを採用し、対象物の伸長変形と接触状態の変化を表現する。単純化のために以下の仮定を設ける。

1. プレートの変位は微小とする。
2. プレートは対象物に比べて十分大きい。
3. 対象物密度は全ての部位で均一とする。
4. 対象物の変形時に生じる粘弾性抵抗は無視できるほど小さい。
5. 対象物の厚さは無視できるほど小さい。
6. プレートと対象物との間にはクーロン摩擦が働き、静止摩擦係数  $\mu_s > 0$ 、動摩擦係数  $\mu_k > 0$  とする。
7. プレートと対象物との衝突は完全非弾性衝突とする。

以上の仮定に基づき、図4(a)に示すような鉛直面内の2次元簡易解析モデルを導入する。プレートは並進  $X$  と回転  $\Theta$  の2自由度を有する。対象物は2つの質点とこれらを連結するダンパから構成される1次元変形モデルで表現する。記号は以下の通りである。

$\Sigma_R$  : 基準座標系。原点はプレート回転軸上に存在し、 $x_R$  軸および  $y_R$  軸はそれぞれ水平および鉛直方向と一致する。

$\Sigma$  : プレートに固定された座標系。 $x$  軸はプレート長手方向、 $y$  軸はプレート面の法線方向と一致する。

$X$  : プレートの並進位置。 $\Sigma_R$  から見た  $\Sigma$  の位置で表され初期状態を  $X=0$  とする。

$\Theta$  : プレートの傾き。 $x_R$  軸と  $x$  軸のなす角で表され、初期状態を  $\Theta=0$  (水平) とする。

$x_i, y_i$  :  $\Sigma$  から見た質点  $i$  の位置を示す座標 ( $i=1, 2$ )。ただし、 $0 < x_1 < x_2$ ,  $0 \leq y_i$ 。

$m$  : 質点の質量。

$c$  : 質点間を繋ぐダンパの粘性係数。

$d$  : 質点間の距離。対象物の長さを表す。

$f_i^N$  : 質点  $i$  に作用する垂直抗力の大きさ ( $i=1, 2$ )。

$f_i$  : 質点  $i$  の摩擦力の大きさ ( $i=1, 2$ )。

$g$  : 重力加速度の大きさ。

仮定4について、本研究では粘性係数  $c=0$  とし、ダンパは実質的にフリー直動関節として

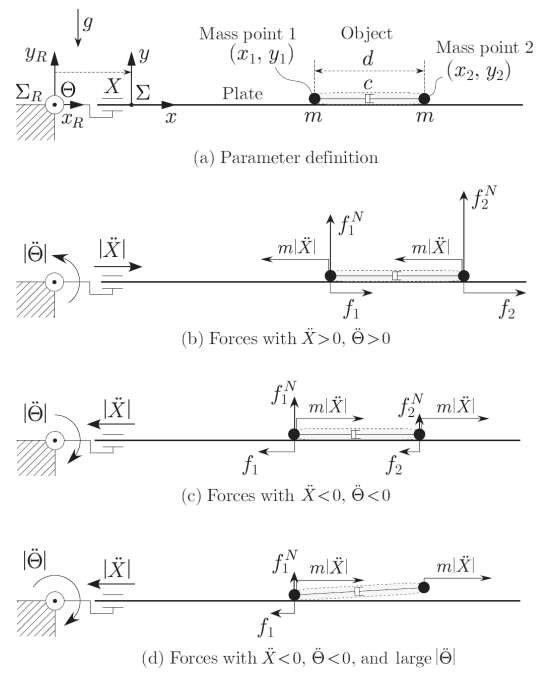


図4 簡易解析モデル

機能するものとする。図4(b)(c)は、プレート加速度に対して各質点に作用する垂直抗力  $f_i^N$ 、水平方向の慣性力  $m|\ddot{X}|$ 、摩擦力  $f_i$  の関係を示している。ただし、図4(b)および(c)は、加速度の方向は異なるが、どちらの場合においても  $\ddot{X}\ddot{\Theta} > 0$  であり、対象物は伸長する。図4(c)の場合においてプレートの角加速度を大きくすると、図4(d)に示すように質点はプレートから浮き上がる。

### 2.2. プレート運動

対象物の変形を連続的に生成するために、正弦波半周期分の波形を連ねた次式で与えられるプレートの周期運動を考える。

$$\Theta(t) = A_d \sin(\pi f t) \quad (1)$$

$$X(t) = B_d \sin(\pi f t)$$

ただし、 $t$  は時刻、 $f$  は振動数であり、プレートの振動周期は  $T = 1/f$  である。また、 $A_d$  および  $B_d$  はそれぞれ角度変位および並進変位の振幅を表している。このとき、プレート加速度は以下で与えられる。

$$\ddot{\Theta}(t) = \begin{cases} -A |\sin(\pi f t)| & (t \neq nT) \\ \frac{A}{|A|} \infty & (t = nT) \end{cases} \quad (2)$$

$$\ddot{X}(t) = \begin{cases} -B |\sin(\pi f t)| & (t \neq nT) \\ \frac{B}{|B|} \infty & (t = nT) \end{cases} \quad (3)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

ただし、 $A = A_d(\pi f)^2$ 、 $B = B_d(\pi f)^2$  は、それぞれ角加速度および並進加速度の振幅である。このようなプレート運動においては、 $t = nT$  の瞬間を除いてプレートの変位と加速度の正負が一定であり、単純正弦波を用いる場合に比べて、プレートおよび対象物の挙動解析が簡単になる。

### 2.3. 伸長変形操作

プレート加速度  $\ddot{X}$ 、 $\ddot{\Theta}$  が、 $A > 0$  かつ  $B >$

0 で与えられる場合を考える. ここで, 角加速度振幅  $A$  が十分に小さいときには, 質点は滑り出さないものとし, 並進加速度振幅  $B$  について次式の条件を与える.

$$B < \mu_s g \quad (4)$$

また, 仮定 1 に基づき, プレートの角度変位については  $\cos \Theta \approx 1$  の近似を与える. 並進変位については  $X \ll x_i$  とし, 式 (1) のプレート並進変位に対して,

$$X(t) + x_i \approx B_d + x_i \quad (5)$$

の近似を与える. 以上のような場合,  $\ddot{X}\ddot{\Theta} \geq 0$  であり, 質点に作用する水平方向の慣性力が摩擦力に打ち勝つことによって対象物に起こり得る変形は, 図 4(c) (d) に示すような伸長変形となる. プレート加速度によって生じる慣性力の働きを考えると, 並進加速度  $\ddot{X}$  による水平方向の慣性力は, 2 つの質点へ等しく作用する. 一方で, 角加速度  $\ddot{\Theta}$  による鉛直方向の慣性力は, 各質点の位置に依存して変化し, 垂直抗力の大きさに差異を生む要因となる. この点に着目し, 以降では, プレートの並進加速度振幅  $B$  を一定とし, 角加速度振幅  $A$  の変化について考察する.

### ③無次元境界振幅

#### 3.1. 質点挙動を切り替える境界振幅

角加速度振幅  $A$  をゼロから徐々に大きくしていく場合の質点のプレートに対する相対運動を考える. 振幅  $A$  が十分に小さい範囲では, 1 周期を通じて質点に作用する水平方向の慣性力に摩擦力が対抗し, 質点はプレート上で静止する. 振幅  $A$  が大きくなると, 周期内で水平方向の慣性力が最大静止摩擦力に打ち勝つ時間帯が存在し, 質点はプレートを滑るようになる. 以上のような質点挙動を切り替える振幅  $A$  の境界は, 次式で与えられる.

$$A_i^S = \frac{\mu_s g - B}{\mu_s (B_d + x_i)} \quad (6)$$

振幅  $A$  が  $A > A_i^S$  を満たすとき, 質点  $i$  はプレート上を滑る. さらに角加速度振幅  $A$  が大きくなると, 質点はプレートから浮き上がる. このように質点挙動を切り替える振幅  $A$  の境界は次式で与えられる.

$$A_i^J = \frac{g}{B_d + x_i} \quad (7)$$

ただし, 浮き始めるまでに質点がプレート上を滑る距離は微小として無視している. 振幅  $A$  が  $A > A_i^J$  を満たす場合, 質点  $i$  はプレートから跳躍し, 放物運動を行う.

続いて, 跳躍した質点が再びプレートに接地するタイミングについて考える.  $A > A_i^J$  の場合について, 質点  $i$  の跳躍開始時刻  $t_i^J$  は次式で表される.

$$t_i^J = \frac{1}{\pi f} \sin^{-1} \frac{g}{(B_d + x_i)A} \quad (8)$$

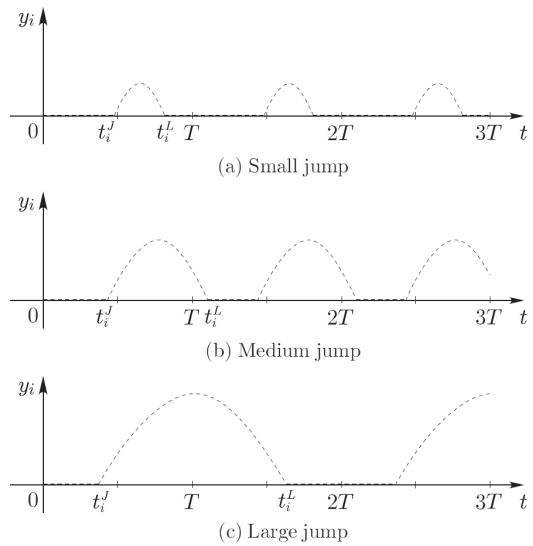


図 5 質点の跳躍挙動

質点が跳躍し, 放物運動を経て, 再びプレートに接地する時刻を  $t_i^L$  とする. 図 5(a) および (b) に, それぞれ  $t_i^L \leq T$  の場合 (小跳躍) および  $t_i^L > T$  の場合 (中跳躍) における質点  $i$  の軌道の鉛直方向成分を示す. このような質点  $i$  の小跳躍と中跳躍を切り替える振幅  $A$  の境界として, 時刻  $t = T$  で質点が再びプレートに接地するような角加速度振幅を  $A_i^L$  とする.  $A_i^L$  の近似解は定数  $\alpha \approx 1.14$  を用いて次の陽関数形式で表すことができる.

$$A_i^L = \alpha \frac{g}{B_d + x_i} \quad (9)$$

小跳躍と中跳躍では着地時のプレートの並進速度の向きが異なり, 質点のプレートに対する水平方向移動距離に影響する. 最後に, 図 5(c) に示すように質点が大きく跳躍し,  $t_i^L \geq T + t_i^J$  となる場合 (大跳躍) を考える. このとき, 第 2 周期における跳躍への移行が遅れ, 第 1 周期に比べて跳躍初速度の鉛直方向成分が小さくなり, 結果として跳躍高さは小さくなる (図 5(c) の場合は, 跳躍ゼロ). このような質点  $i$  の大跳躍と中跳躍を切り替える振幅を  $A_i^C$  とする. 以降では, 質点の挙動を統一させるという観点から, プレートの角加速度振幅を  $A < A_i^C$  の範囲に制限する. このとき, 質点 1 つにつき  $A_i^S, A_i^J, A_i^L$  の 3 つの境界振幅が存在し, 2 質点に対して合計 6 つの境界振幅が存在する. 質点  $i$  の境界振幅について大小関係は

$$A_i^S \leq A_i^J < A_i^L \quad (i = 1, 2) \quad (10)$$

また,  $x_1 < x_2$  であるため, 2 質点の境界振幅に対して以下の大小関係が成り立つ.

$$A_2^j < A_1^j \quad (j = S, J, L) \quad (11)$$

#### 3.2. 無次元境界振幅

境界振幅の中で最小である  $A_2^S$  を用いて角加速度振幅  $A$  を規格化し,  $\bar{A}$  とする. このとき, 境界振幅は以下のような無次元境界振幅に変換される.

$$\begin{aligned}\bar{A}_2^S &\triangleq \frac{A_2^S}{A_2^S} = 1 \\ \bar{A}_2^J &\triangleq \frac{A_2^J}{A_2^S} = \frac{\mu_s g}{\mu_s g - B} \\ \bar{A}_2^L &\triangleq \frac{A_2^L}{A_2^S} = \alpha \frac{\mu_s g}{\mu_s g - B} \\ \bar{A}_1^S &\triangleq \frac{A_1^S}{A_2^S} = \bar{x} \\ \bar{A}_1^J &\triangleq \frac{A_1^J}{A_2^S} = \bar{x} \frac{\mu_s g}{\mu_s g - B} \\ \bar{A}_1^L &\triangleq \frac{A_1^L}{A_2^S} = \bar{x} \alpha \frac{\mu_s g}{\mu_s g - B} \\ \bar{x} &\triangleq \frac{B_d + x_2}{B_d + x_1}\end{aligned}$$

無次元境界振幅  $\bar{A}_i^j$  ( $i=1, 2, j=S, J, L$ ) は、質点 2 が滑り出す最小の振幅の大きさを 1 としたとき、どのくらいの大きさの振幅を与えれば質点 1 および 2 の挙動が切り替わっていくのかを表している。無次元境界振幅の値は、質点個々の位置や質量にかかわらず、 $\mu_s, \bar{x}$  の 2 つの無次元パラメータに対して一意に決定する。図 6 に、無次元境界振幅に対する質点挙動の切り替わりを示す。ただし、質点の静止を N、滑りを S、小跳躍を  $J_s$ 、中跳躍を  $J_m$  で表記し、質点  $i$  の挙動を  $p_i = \{N, S, J_s, J_m\}$  とする。無次元境界振幅間の大小関係は、無次元化前の大小関係に準拠する。したがって、6 つの無次元境界振幅の大小関係として、以下の 5 通りが存在し得る。

- 順序 1:  $\bar{A}_2^S = 1 \leq \bar{A}_2^J < \bar{A}_2^L \leq \bar{A}_1^S \leq \bar{A}_1^J < \bar{A}_1^L$   
 順序 2:  $\bar{A}_2^S = 1 \leq \bar{A}_2^J \leq \bar{A}_1^S \leq \bar{A}_2^L \leq \bar{A}_1^J < \bar{A}_1^L$   
 順序 3:  $\bar{A}_2^S = 1 < \bar{A}_1^S \leq \bar{A}_2^J < \bar{A}_1^J \leq \bar{A}_2^L < \bar{A}_1^L$   
 順序 4:  $\bar{A}_2^S = 1 < \bar{A}_1^S \leq \bar{A}_2^J < \bar{A}_2^L \leq \bar{A}_1^J < \bar{A}_1^L$   
 順序 5:  $\bar{A}_2^S = 1 \leq \bar{A}_2^J \leq \bar{A}_1^S \leq \bar{A}_1^J \leq \bar{A}_2^L < \bar{A}_1^L$

上記は、無次元振幅をゼロから増加していく際の無次元境界振幅の発現順序を示す。

#### ④ シミュレーション実験

##### 4.1. シミュレーション設定

MD Adams (MSC Software Corp.) を使用する。パラメータとして、 $m=1.0$  [g],  $c=0$  [Ns/mm] を設定する。プレートの運動パラメータとして、並進加速度振幅  $B=3000$  [mm/s<sup>2</sup>] (並進変位振幅  $B_d=3.0$  [mm]), 振動数  $f=10$  [Hz] を与える。対象物とプレートの接触力計算にはペナルティ法とクーロン摩擦に基づく接触モデルを用いる。垂直抗力の計算に用いる粘弾性パラメータは、完全非弾性衝突 (仮定 7) に対応するように決定し、 $k_{cd}=79.1$  [N/mm<sup>2</sup>],  $c_{cd}=5.1 \times 10^{-2}$  [Ns/mm] を与える。摩擦力の計算に用いる静止摩擦遷移速度および動摩擦遷移速度はそれぞれ  $v_s=1.0 \times 10^{-2}$  [mm/s],  $v_k=1.0$  [mm/s] とし、静止摩擦係数  $\mu_s$  に対して動摩擦係数  $\mu_k = \mu_{s2}$  と仮定する。シミュレーション時間  $T_s$  はプレート振動 3 周期分  $T_s$

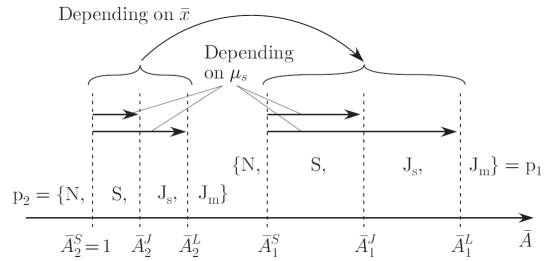


図 6 無次元境界振幅と質点挙動変化

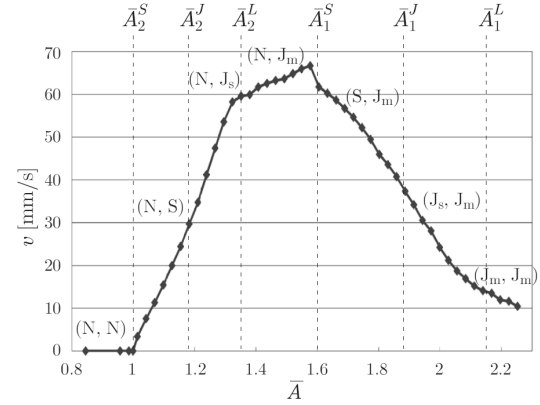


図 7 無次元振幅に対する変形速度変化

= 0.3 [s] とする。対象物の変形速度  $v$  を、伸長変形量  $\Delta d$  [mm] とシミュレーション時間  $T_s$  [s] を用いて、 $v = \Delta d / T_s$  [mm/s] と定義する。対象物を構成する質点の初期位置は、 $x_1=165$  [mm],  $x_2=265$  [mm] とする。

##### 4.2. 対象物変形速度と最適振幅

図 7 に、無次元振幅  $\bar{A}$  と対象物の変形速度  $v$  の関係を示す。図中には、事前に算出しておいた無次元境界振幅 (この場合は順序 1)、ならびに対象物の挙動パターン ( $p_1, p_2$ ) の遷移も付記している。対象物速度の変化に着目してみると、変形速度ラインは無次元境界振幅の周辺において編曲することがわかる。これは、無次元境界振幅によって質点の挙動が切り替わり、対象物全体の変形挙動パターンが遷移することに起因している。両質点が静止した状態 (N,N) から、 $\bar{A}$  の増加に伴って質点 2 のみが滑り (N,S)、続いて跳躍 (N, $J_s$ ) (N, $J_m$ ) を行うことで質点間の速度差が増加していき、変形速度が上昇する。その後、質点 1 も滑り (S, $J_m$ )、続いて跳躍 ( $J_s, J_m$ ) ( $J_m, J_m$ ) を行うことで質点間の速度差が減少していき、変形速度が下降する。ただし、変形操作中に 2 つの質点位置は随時変化するため、厳密には、これに対応した無次元境界振幅の値も時々刻々と変化する。図 7 に示された無次元境界振幅は質点の初期位置を用いて事前に算出した値のため、変形速度ラインの変曲点とは完全には一致しない。しかしながら、変形速度の増減傾向は事前に算出した無次元境界振幅における速度によって十分に特徴付けられており、変形速度  $v(\bar{A}_i^j)$  を計算するだけで、無次元振幅に対する変形速度の概形を把握することが可能である。よって、変形速度を最大化する無次元振幅の最適解を獲得するためには、無次元

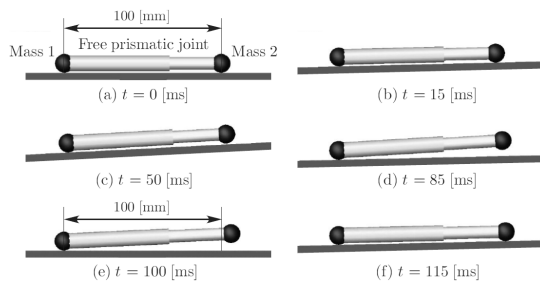


図8 最適プレート運動時の対象物挙動

境界振幅の周辺にのみ着目して変形速度を調べればよい。図7の場合、 $\bar{A}_1^s$ 周辺に最適解が存在し、 $\bar{A} = 1.58$ をその近似解とみなすことができる。図8に、このときの対象物の変形挙動を示す。この場合の対象物の挙動パターンは $(p1, p2) = (N, J_m)$ であり、質点1がプレート上で静止し続ける一方で、質点2が跳躍して右方向に移動していき、変形速度 $v = 67[\text{mm/s}]$ を達成している。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 東森充, 丁世勳, 多田隈建二郎, 金子真, 稲原知幸: 無次元境界振幅に基づく非把持伸縮マニピュレーションの最適化, 日本ロボット学会誌, 査読有り, vol. 32, no. 8, pp. 743-752, 2014.
- ② M. Nakauma, S. Ishihara, T. Funami, T. Yamamoto, and M. Higashimori: Deformation Behavior of Agar Gel on a Soft Substrate During Instrumental Compression and Its Computer Simulation, Food Hydrocolloids, 査読有り, vol. 36, pp. 301-307, 2014.
- ③ I. G. Ramirez-Alpizar, M. Higashimori, and M. Kaneko: Characterization of Deformable Objects by Using Dynamic Nonprehensile Manipulation, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有り, vol. 25, no. 1, pp. 252-261, 2013.
- ④ 吉本佳世, 東森充, 多田隈建二郎, 金子真: 塑性変形分布則に基づくレオロジー物体の能動的概形シェイピング, 計測自動制御学会論文集, 査読有り, vol. 48, no. 9, pp. 553-562, 2012.
- ⑤ I. G. Ramirez-Alpizar, M. Higashimori, M. Kaneko, C. Tsai, and I. Kao: Dynamic Nonprehensile Manipulation for Rotating a Thin Deformable Object: an Analogy to Bipedal Gaits, IEEE Transactions on Robotics, 査読有り, vol. 28, no. 3, pp. 607-618, 2012.

[学会発表] (計 10 件)

- ① M. Higashimori, T. Inahara, and M. Kaneko: Nonprehensile Shaping of a Deformable Object by Using Its

Gait-Like Behaviors, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA13), (Karlsruhe, Germany, 2013. 5. 8), pp. 3236-3241.

- ② I. G. Ramirez-Alpizar, M. Higashimori, and M. Kaneko: Identification of a Thin Flexible Object with Bipedal Gaits, Proc. of 8th IEEE Int. Conf. on Automation Science and Engineering (CASE2012), (Seoul, Korea, 2012. 8. 23), pp. 952-957.
- ③ 中馬誠, 石原清香, 船見孝博, 山本武, 東森充: ソフトマテリアル上で圧縮した寒天ゲルの変形挙動とそのコンピューターシミュレーション, 第63回高分子討論会, 3W06, 2014.
- ④ 夏原裕也, 東森充, 多田隈建二郎, 金子真: 能動・受動複合関節の振動方向可変効果を利用した非把持マニピュレーション, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 3P1-V02, 2014.
- ⑤ 丁世勳, 東森充: 非把持形態による柔軟物体の移動と変形の同時マニピュレーション, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会, 121-4, 2014.
- ⑥ 社本大, 東森充, 金子真: 柔・剛2層プレートによる非把持マニピュレーションの実験的考察, 第14回計測自動制御学会 SI 部門講演会 (SI2013) 論文集, pp. 2555-2556, 2013.
- ⑦ 社本大, 東森充, 金子真: 柔・剛2層プレートによる非把持ダイナミックマニピュレーション, 第31回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2N1-01, 2013.
- ⑧ 稲原知幸, 東森充, 金子真: 非把持形態による柔軟物体の最適伸縮マニピュレーション, 第13回計測自動制御学会 SI 部門講演会 (SI2012) 論文集, pp. 2016-2020, 2012.
- ⑨ 東森充, 黒瀬優介, 金子真, 福田修: 咀嚼圧力分布に基づく食品テクスチャセンシング, 第30回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3B2-5, 2012.
- ⑩ 社本大, 東森充, 金子真, 金子真, 福田修: 柔軟物体の非把持折りたたみマニピュレーション, 第30回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3B2-1, 2012.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

東森 充 (HIGASHIMORI, Mitsuru)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 30346522

##### (2) 研究分担者

多田隈建二郎 (TADAKUMA, Kenjiro)  
大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 30508833