

のこぎり歯形状を有する表面による マイクロパーツの輸送

平井 慎一* , 三谷 篤史**

* 立命館大学 ロボティクス学科

** 札幌市立大学 デザイン学科

概要 正負方向で摩擦特性が異なる, のこぎり歯形状を有する表面によりマイクロパーツを輸送する手法を紹介する. シリコンウエハの表面にダイサーでのこぎり歯形を生成すると, 対称な振動によりマイクロパーツの輸送が可能になることを実験的に示し, その力学解析を示す.

1 はじめに

近年, 基盤実装用の小型抵抗やコンデンサが大量に用いられている. これらのマイクロパーツは外観検査を通して, 欠けやクラックを持たない良品を選別する. 現在これらのプロセスは, 複数台のカメラにより外観検査を行なう装置とマイクロパーツフィーダと呼ばれる振動式パーツ輸送装置を用いて自動化されている. 従来のパーツフィーダは水平方向の振動だけでなく, 垂直方向の振動も利用しており, 斜め振動や機械的な傾きを利用する方法 [1, 2] や, 水平方向と垂直方向それぞれに振動をあたえる方法 [3] が提案されている. 微小かつ軽量のマイクロパーツの接触運動においては, 重力などの体積に比例する力に比して, 接触面積に比例する凝着力の効果が支配的となる [4]. マイクロパーツの小型軽量化が進めば, 凝着力の効果がさらに大きくなる. よって, 凝着力に打ち克つために必要な慣性力は大きくなり, パーツの跳躍による不安定化は避けられない. また, 正方向, 逆方向の加速度を変化させることにより一方向の慣性力を得る方法が提案されている [5]. 凝着力に打ち克つために必要な慣性力を得るためには, 振動の周波数を上げて加速度を増やす必要がある. しかしながら, 正方向と逆方向で加速度が異なる非対称な振動においては, 周波数を上げることは容易ではない. 以上の考察から, マイクロパーツの搬送のためには, 1) 周波数を上げやすい対称振動を用い, 2) 正方向と負方向の駆動力が異なる搬送が求められる.

対称振動を用いる限り, 正方向と負方向の慣性力は同じである. 正方向と負方向の駆動力を変えるためには, 正方向と負方向の摩擦力を変えれば良い. このような考察に基づき, 筆者らは, Fig. 1 に示す, のこぎり歯表面を有するマイクロパーツフィーダを提案している [6]. この機構は, 振動式フィーダの表面にのこぎり歯形状の溝加工を施し, マイクロパーツとフィーダの接触条件を正負方向で変化させることで, 対称な平面振動による一方向輸送を実現する.

2 実験

ワークの凸部によりワークが一方向へ輸送されることを, 実験的に確認する. セラミックコンデンサと凹凸のない試験用ワークを同時に輸送してその運動を比較した. 凹凸のない試験用ワークと

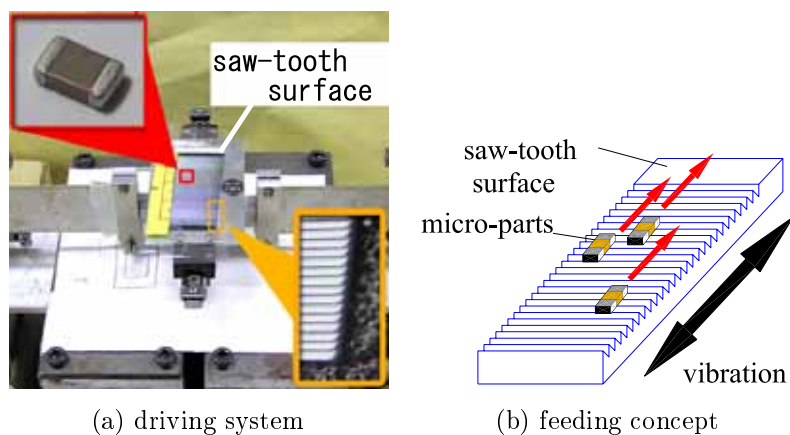


Fig.1: Micro-parts feeder

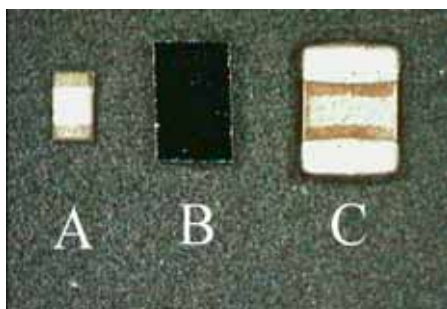


Fig.2: Three works for experiment

してシリコンウエハ片を用いた．実験に用いたワークの外観を Fig. 2 に示す．また，Fig. 2 に示した，A はセラミックコンデンサ 1005 型，B は凹凸のない試験用ワークのシリコンウエハ片，C はセラミックコンデンサ 2012 型である．各々の試験片の仕様を Table 1 に示す．

輸送実験に使用するフィーダ表面を Table 2 に示す．ここでは，Table 2 に示す $\theta = 30^\circ$ のシリコンウエハを用いる．駆動信号の電源を 120V，周波数を 15Hz としたのこぎり歯形状の傾斜面が奥行きの場合（正方向配置）と手前側の場合（負方向配置）についてそれぞれ実験を行い，ワークの運動をフォトロン製の高速カメラ FASTCAM を用いて撮影した．フィーダ表面の長さは約 3cm である．FASTCAM を用いて約 4 秒間撮影し，連続写真加工を行なった結果を Fig. 3 に示す．正方向において，セラミックコンデンサ 1005 型，2012 型はそれぞれ一方向輸送が実現されているのに対し，シリコンウエハ片は前進と後退を繰り返し，輸送距離はセラミックコンデンサ 1005 型の約半分となった．また，負方向においても，セラミックコンデンサ 1005 型，2012 型は一方向輸送が実現しているのに対し，シリコンウエハ片は同一方向へ運動を開始した直後に後退し，最終的

Table 1: Specifications of splinter of silicon wafer and ceramic capacitor

Type	Size (t × w × h [mm ³])	Weight [mg]
A: ceramic capacitor 1005	1.0 × 0.5 × 0.5	1.2
B: splinter of silicon wafer	2.0 × 1.5 × 0.5	2.0
C: ceramic capacitor 2012	2.0 × 1.2 × 0.6	7.5

Table 2: Specifications of surface shape parameter

Type	p [mm]	l [mm]	d [mm]
$\theta=30^\circ$ [deg]	0.1835	0.1835	0.1059
$\theta=60^\circ$ [deg]	0.0611	0.0611	0.1059

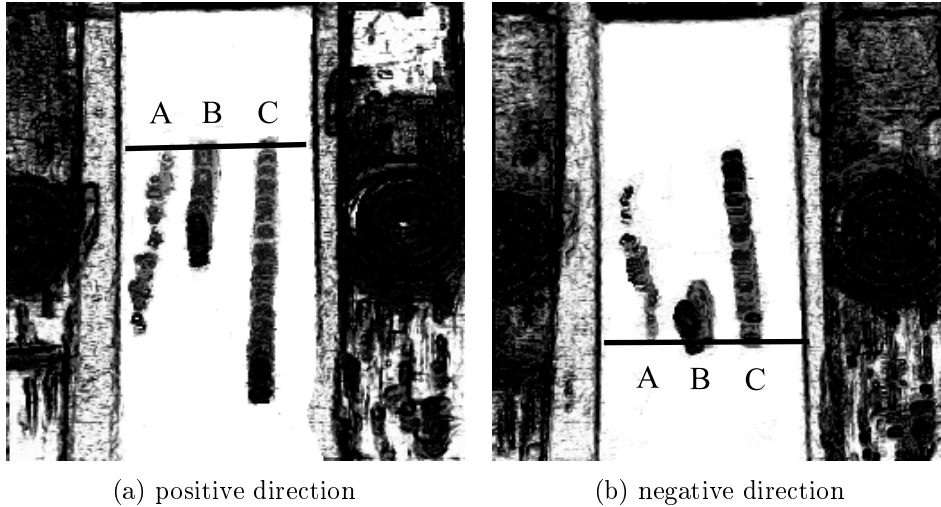


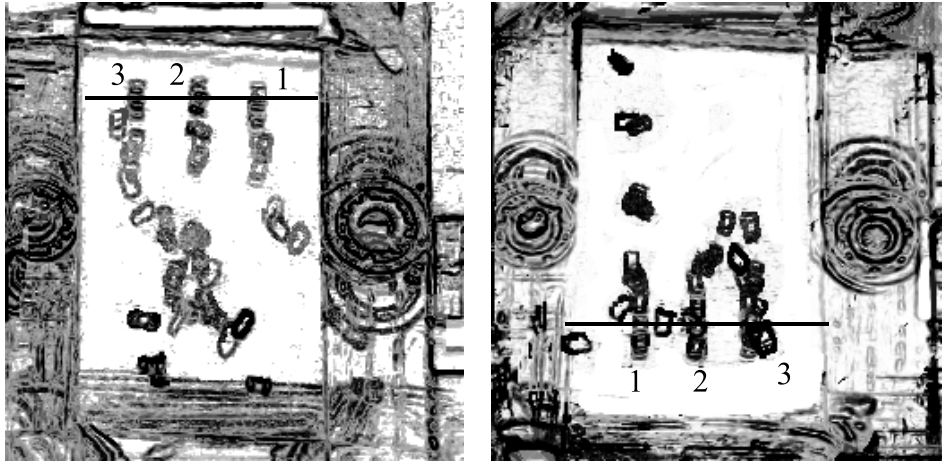
Fig.3: Directionality of feeding

にはほぼ初期位置まで後退した．したがって凹凸のないシリコンウエハ片では運動の方向性が得られず，凹凸のあるワークにおいては一方向輸送が実現されることを確認した．

セラミックコンデンサ 2012 型の輸送実験 フィーダ表面として，Table 2 に示す $\theta=30^\circ$ のシリコンウエハを用いて，セラミックコンデンサ 2012 型のワーク輸送実験を行なった．10Hz 駆動時での実験結果を Fig. 4 に示す．正方向配置においては，駆動中にワークの回転や跳躍，横転が頻繁に生じており，輸送状態は不安定である．負方向についても同様に，ワークの回転や跳躍，横転が頻繁に生じ，輸送状態は不安定である．15Hz 駆動時での実験結果を Fig. 5 に示す．撮影時間は約 4 秒である．正負方向どちらも良好な実験結果が得られた．また，シリコンウエハの配置によってワークの輸送方向が逆転することが確認された．Fig. 6 に 30Hz 駆動時において約 8 秒間撮影した結果を示す．この場合，運動の方向性は見られるものの輸送がほとんど行なわれておらず，輸送開始位置からほとんど動いていないワークが存在する．

フィーダ表面を Table 2 に示す $\theta=60^\circ$ のシリコンウエハに変更し， 30° 表面を用いる場合で最も良好な結果が得られた 15Hz 駆動時と同一の駆動条件で実験を行なった．約 2 秒間の撮影結果を Fig. 7 に示す．正方向においては，2 番のワークのみが約 2 秒で一番下まで到達している．他のパーツは搬送されていない．負方向においては，2 番と 3 番のワークは上方向に進んでいるがほとんど輸送されていない．したがって， $\theta=60^\circ$ のシリコンウエハでは輸送の方向性は得られなかった．

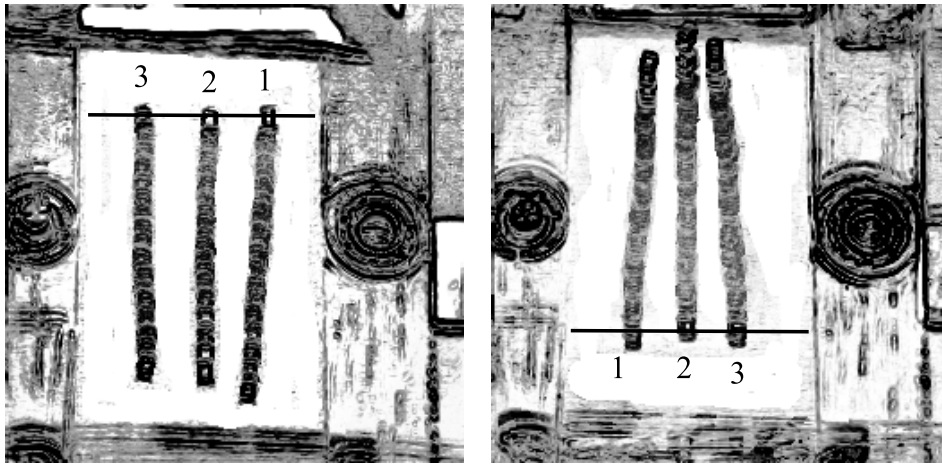
以上のように， 30° 表面を用いる場合，15Hz での駆動で最も良好な結果が得られた．しかし，3cm の輸送に 4 秒以上かかっており，速度の面では十分でない．したがって，より良好な輸送条件が得られる駆動パラメータや表面形状の検討を行なう必要がある．10Hz 駆動では跳躍や回転などの運動がワークに生じ，安定した輸送が行なえない．これは，フィーダの振動振幅が大きいために，フィーダ表面とワークの接触時における衝撃力が大きく，接触点を支点とした回転モーメント



(a) positive direction

(b) negative direction

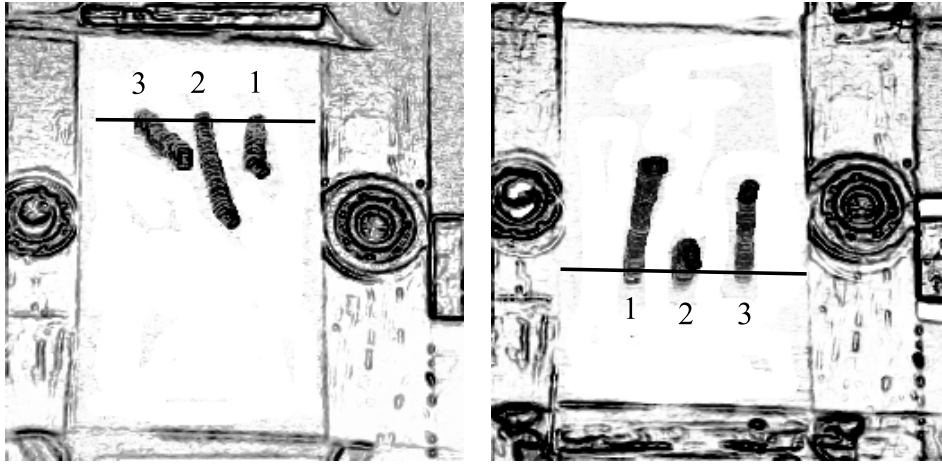
Fig.4: 2012 Motion at 10Hz square wave on $\theta=30^\circ$ surface



(a) positive direction

(b) negative direction

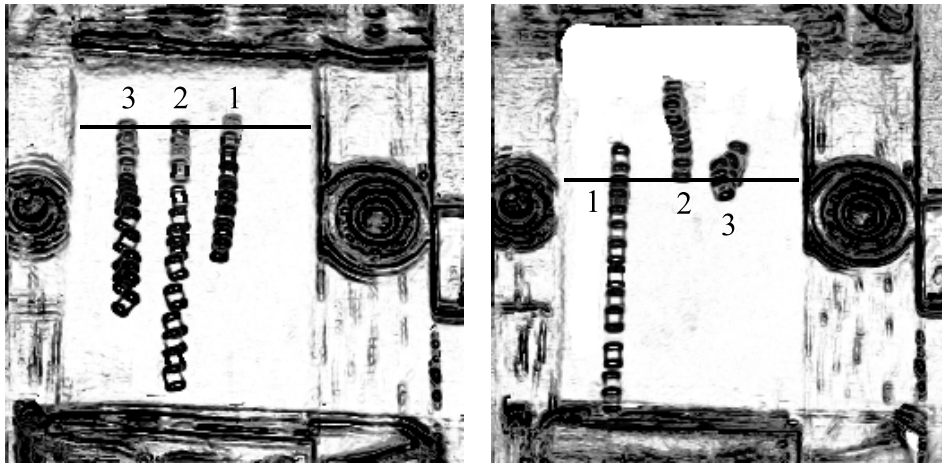
Fig.5: 2012 Motion at 15Hz square wave on $\theta=30^\circ$ surface



(a) positive direction

(b) negative direction

Fig.6: 2012 Motion at 30Hz square wave on $\theta=30^\circ$ surface



(a) positive direction

(b) negative direction

Fig.7: 2012 Motion at 15Hz square wave on $\theta=60^\circ$ surface

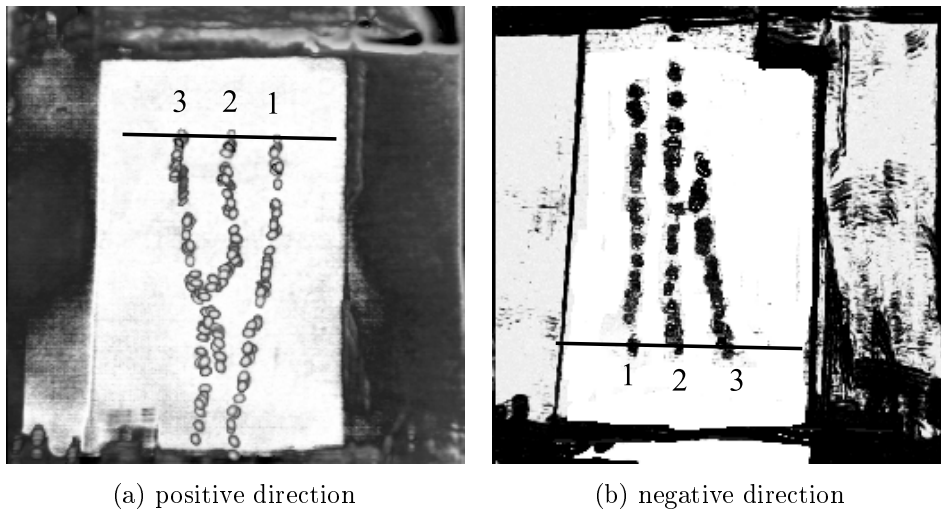


Fig.8: 1005 Motion at 15Hz square wave on $\theta=30^\circ$ surface

が発生し、ワーク先端が浮き上がる現象が生じたと考えられる。30Hz 駆動においては、フィーダの振動振幅が小さすぎたため、のこぎり歯斜面を登る十分な力が得られないためだと考える。60°表面を用いる場合、運動の方向性は得られなかった。

セラミックコンデンサ 1005 型の輸送実験 セラミックコンデンサ 2012 型より小型で軽量なセラミックコンデンサ 1005 型のパーツの輸送実験を行なった。実験の条件は、30°表面で 15Hz で駆動したときと同じである。また、フィーダ表面として Table 2 に示す $\theta=30^\circ$ のシリコンウエハを用いた。約 5 秒間撮影した結果を Fig. 8 に示す。この場合、シリコンウエハの向きによって運動の方向が変わっている。

セラミックコンデンサ 1005 型は、2012 型よりも小型で軽量であるため、フィーダ表面の加工精度やワークの個体差といった要素がワークの運動に大きく影響を及ぼす。30°表面において 15Hz で駆動したときと比較すると、セラミックコンデンサ 2012 型に比して、低速な運動になっている。これはセラミックコンデンサ 1005 型が 2012 型より小型かつ軽量であるため、フィーダ駆動により生じるワークの慣性力が小さくなり、相対的に凝着力による影響が大きくなったためである。また、輸送時の左右への運動は、パーツの個体差やのこぎり歯形状の加工精度などの要素が接触条件の変動をもたらしたためであると推測される。

3 輸送モデル

適切な接触条件が得られる表面形状を設計するためには、マイクロパーツの表面あらさを把握し、それに応じたのこぎり歯表面を選択する必要がある。そこで、マイクロパーツの表面あらさを球面でモデル化し、それらとのこぎり歯の接触状態を解析する。また、マイクロパーツの動特性モデルを導出し、のこぎり歯表面の振動による輸送におけるダイナミクスを導出する。さらに、それらのモデルを用いてシミュレーションを行い、のこぎり歯のピッチと輸送の関係を確かめる。

マイクロパーツのダイナミクス マイクロパーツとして、基板実装用セラミックコンデンサを用いる。Fig. 9 に、セラミックコンデンサの外観および表面形状を示す。マイクロパーツの電極表面に

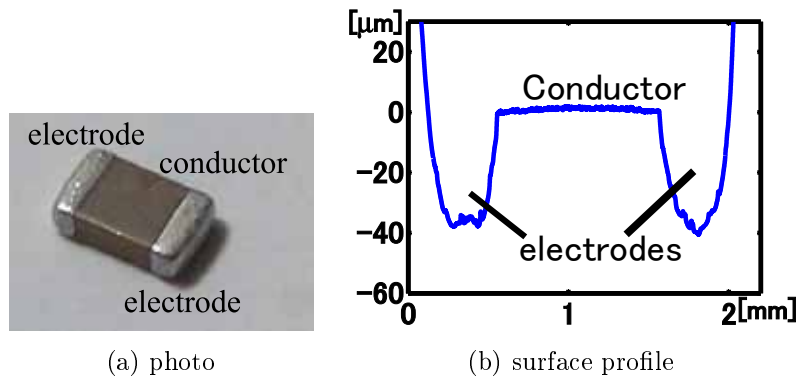


Fig.9: Ceramic capacitor

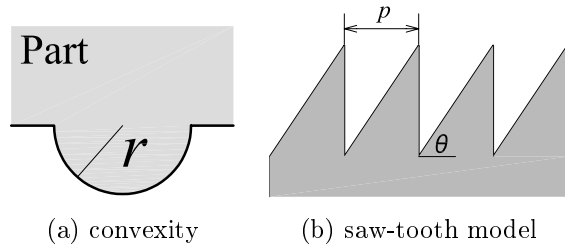


Fig.10: Surface profile model : convexity

は、多くの凸部が存在する．本研究では、これらの凸部を半径 r の半球面であると仮定し、それらとのこぎり歯が接触する場合について検討する．Fig. 10 に凸部モデルおよびのこぎり歯モデルを示す．凸部とのこぎり歯の接触においては、斜面と接触する場合 (Fig. 11(a))、および先端と接触する場合 (Fig. 11(b)) とに分けられる．ここでは、それぞれの接触状態において、のこぎり歯の駆動によって伝わる駆動力の静力学的関係を導く．

Fig. 12(a) に示すように、凸部の中心に座標形 $O - xy$ をとる．また、斜面接触の接触角を ϕ_0 とする．いま、のこぎり歯の斜面が凸部に対して F_c の力で接触する場合を考える．このとき、凸部の駆動力は、凸部を左方向へ押し力と、のこぎり歯から受ける反力 $F_0 = -F_c$ により斜面を登る力の和で表される．斜面を上る力 f_{rs} は、斜面と凸部の摩擦係数を μ_s とすると以下のように表される．

$$f_{rs} = F_0 \sin \theta - \mu_s F_0 \cos \theta \quad (1)$$

したがって、凸部の駆動力 F_s は以下の式となる．

$$F_s = F_c + f_{rs} \cos \theta = -F_0(1 - \cos \theta(\cos \theta - \mu_s \sin \theta)) \quad (2)$$

ただし、 $\cos \theta - \mu_s \sin \theta < 0$ となる場合には斜面でのすべりが生じないため、駆動力は $F_s = F_c = -F_0$ となる．

Fig. 12(b) において、 ϕ を先端接触の接触角とする．のこぎり歯の先端が凸部に F_0 の力で接触する場合、のこぎり歯から凸部に加わる力は、法線方向分力 $f_{ns} = F_0 \cos \phi$ と、のこぎり歯の先端が凸部をすべる場合に生じる摩擦抗力 $f_{rp} = \mu_e f_{ns}$ の合力である．なお、 μ_e は先端接触の摩擦係数である．凸部の駆動力 F_e は、合力の x 成分すなわち

$$F_e = f_{np} \cos \phi + f_{rp} \sin \phi = F_0 \cos \phi(\cos \phi + \mu_e \sin \phi) \quad (3)$$

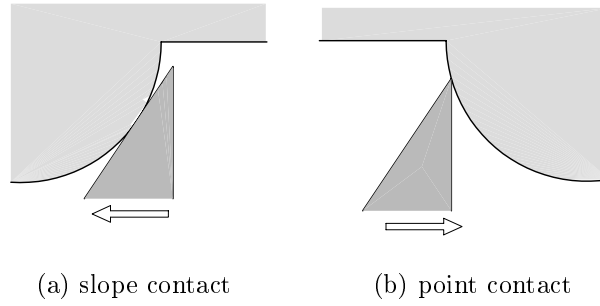


Fig.11: Contact condition of a convexity and two saw-tooth

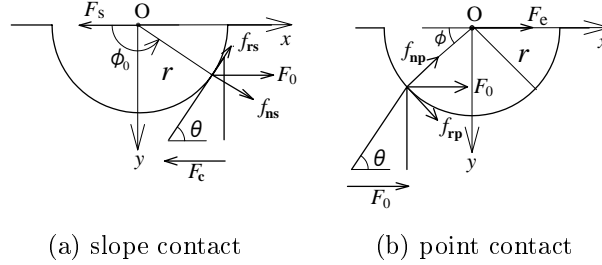


Fig.12: Statics of each contact condition

となる．ただし，先端接触にすべりが生じない場合，すなわち $\sin \phi - \mu_e \cos \phi < 0$ となるときには $F_e = F_0$ となる．

Fig. 13 に示すように，のこぎり歯表面に基準座標系 $O - x_0y_0$ をとり，基準座標系におけるマイクロパーツの位置および姿勢を $P = [x_c, y_c, \phi_c]^T$ で表す．また，Fig. 14 のようにマイクロパーツの重心を原点としたパーツ座標系 $G - x_gy_g$ を定義し，パーツ表面の凸部の位置および半径をそれぞれ $c_i = [cx_i, cy_i]^T$ ， r_i ($i = 1, 2, \dots$) で表す．マイクロパーツの運動方程式は以下の式で表される．

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_c \\ \ddot{y}_c \\ \ddot{\phi}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 & 0 \\ 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\phi}_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで， m および I はマイクロパーツの質量および慣性モーメント， c および d は並進および回転運動における粘性減衰係数である．マイクロパーツの駆動力およびトルク $f = [F_x, F_y, \tau]^T$ は，それぞれの凸部が受ける駆動力の和から計算される．マイクロパーツの表面に n 個の凸部があるとし，凸部 c_i が受ける接触力を F_i とする．のこぎり歯表面は x_0 軸方向に振動するため， F_i は Fig. 14(b) に示すように x_0 軸に平行に生じる．このとき， F_i によって生じる駆動力および駆動トルク ${}^g f_i = [{}^g f_{xi}, {}^g f_{yi}, {}^g \tau_i]^T$ は

$${}^g f_i = \begin{bmatrix} F_i \cos \phi_g \\ -F_i \sin \phi_g \\ -F_i (cx_i \sin \phi_g + cy_i \cos \phi_g) \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる．最終的に，マイクロパーツの駆動力およびトルクは，マイクロパーツ座標系から基準座標系への変換行列 $R(\phi_g)$ を用いて以下のように表される．

$$f = R(\phi_g) {}^g f_{\text{total}} \quad (6)$$

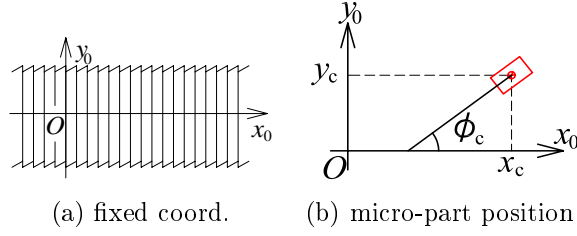


Fig.13: Fixed coordinate system

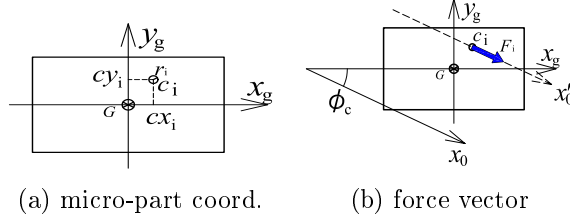


Fig.14: Micro-part coordinate system

ただし,

$${}^g f_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n {}^g f_i, \quad R(\phi_g) = \begin{bmatrix} \cos \phi_g & -\sin \phi_g & 0 \\ \sin \phi_g & \cos \phi_g & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

である.

次に, 各凸部における接触力 F_i について検討する. 接触力 F_i は, のこぎり歯と凸部の接触状態だけでなく相対的な運動によっても変動する. のこぎり歯と凸部が互いに離れる方向に運動する場合には, 接触力は $F_i = 0$ となる. また, 凸部が小さいと, のこぎり歯との接触が生じない場合も起こりうる. したがって, 接触力は以下ようになる.

$$F_i = \begin{cases} F_s, & \text{slope contact with pushing.} \\ F_e, & \text{point contact with pushing.} \\ 0, & \text{no contact or separated motion.} \end{cases} \quad (7)$$

シミュレーション のこぎり歯の仰角を $\theta = 30\text{deg}$, マイクロパーツの初期位置・姿勢を $P_0 = [0, 0, \pi/2]^T$ とし, 凸部が x_g 軸上に一つ存在する場合のシミュレーションを行った. ここでは, 輸送対象のマイクロパーツを 2012 型のチップコンデンサ (サイズ: $2.0 \times 1.2 \times 0.6 \text{ mm}$, 質量: 7.5 mg) とし, 凸部の位置を $c_1 = [0.65\text{mm}, 0\text{mm}]^T$, 半径を $r_1 = 0.05\text{mm}$ とし, のこぎり歯のピッチを $p = 0.25, 0.167, 0.125, 0.1, 0.083, 0.071, 0.0625\text{mm}$ とした場合について行った. この場合, マイクロパーツは x_0 軸の正方向に動きながら, 凸部 c_1 による回転モーメントが $\tau = 0$ になる姿勢すなわち $\phi_g = 0\text{deg}$ に近づいていくことが予想される. シミュレーション結果を Fig. 15 に示す. 図 (a) は x_0 軸方向の輸送距離, (b) は姿勢を示す. $p = 0.167, 0.0625\text{mm}$ においては, 位置・姿勢とも初期状態から動いていない. 輸送速度のピークは 0.083mm であり, $p = 0.1\text{mm}$ においてもほぼ同等の輸送結果が得られている. また, $p = 0.125$ および 0.071mm においては, $p = 0.083\text{mm}$ よりも低速であるものの, 位置・姿勢とも予測された運動が行われている. これらのことから, ある大きさの凸部に対して, 最も良好な輸送条件が得られるのこぎり歯のピッチが存在することがわかる. したがって, よりよい輸送条件を得るためには, マイクロパーツの表面あらさに応じてのこ

ごり歯表面を設計する必要がある。すなわち、マイクロパーツ表面の精密な計測およびモデリング手法の確立が必要である。

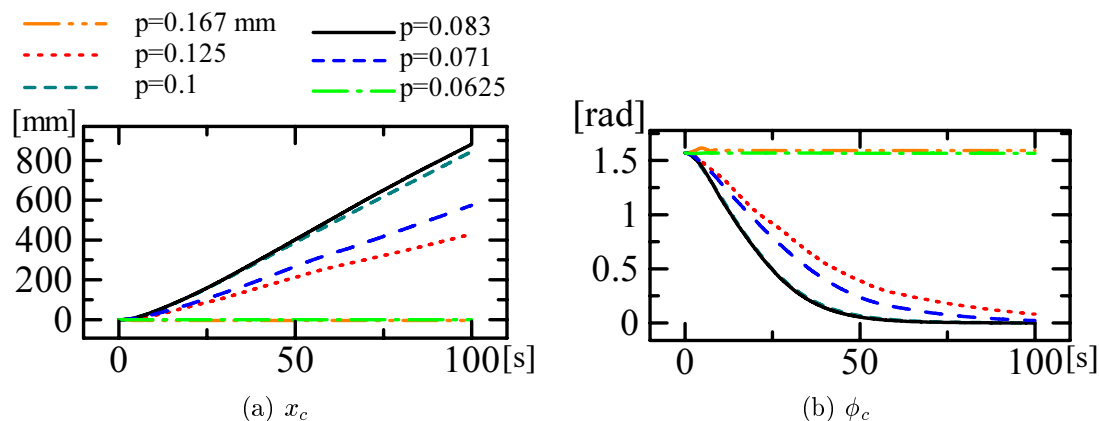


Fig.15: Simulation results

4 おわりに

のごり歯形状を有する表面を対称駆動させることでマイクロパーツを輸送できることを実験的に示し、その力学モデルから搬送のシミュレーションを実現した。今後の課題は、1) さらに小型のパーツの搬送、2) 凝着力を考慮した力学モデリング、3) のごり歯形状の設計である。

参考文献

- [1] 坂口克己, 谷口修, 振動式フィーダの研究 (第 2 報), 日本機械学会論文集 (第 1 部), Vol.35, No.279, pp.2183–2189, 1969.
- [2] Peter Wolfsteiner and Friedrich Pfeiffer, The Parts Transportation in a Vibratory Feeder, IUTAM Symposium on Unilateral Multibody Contacts, pp.309–318, 1999.
- [3] Peter U. Frei, An Intelligent vibratory Conveyor for the Individual Object Transportation in Two Dimension, Proc. of 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1832–1837, 2002.
- [4] 藤澤悟, 安藤泰久, 榎本祐嗣, マイクロスケール摩擦と表面間力, トライボロジスト, Vol.44, No.6, pp.409–413, 1999.
- [5] Winncy Y. Du and Stephen L. Dickerson, Modelling and Control of A Novel Vibratory Feeder, Proc. of 1999 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, Atlanta, USA, pp.496–501, 1999.
- [6] 三谷篤史, 菅野直人, 平井慎一, のごり歯形状を有する表面によるマイクロパーツの輸送, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.71, No.704, pp.1169–1176, 2005.