

のこぎり歯表面による振動輸送における マイクロパーツのダイナミクス

三谷篤史 (札幌市立大学) 菅野直人 (松下電工) 平井慎一 (立命館大学)

Dynamics of Micro-Parts on Micro-Parts Feeder with a Saw-tooth Surface

Atsushi MITANI(Sapporo City Univ.), Naoto SUGANO(Matsushita Elec. Indus. Co. Ltd.),
and Shinichi HIRAI(Ritsumeikan Univ.)

Abstract— This paper investigates the dynamics of micro-parts on a micro-parts feeder using a saw-tooth surface that can realize unidirectional feeding with simple planar and symmetric vibration. When a saw-tooth surface is applied for vibratory micro-parts feeder, two contacts occur by the relative position between the saw-tooth surface and a micro-part: slope contact and point contact. Micro-parts move in one direction by the driving force according to the contact between the micro-parts and the saw-tooth surface. We formulate the driving force at each contact and dynamics of micro-parts with adhesion force. We then conduct the numerical simulation using derived statics and dynamics. We compare the experimental and simulation results to examine the derived dynamics.

Key Words: micro-parts feeder, saw-tooth surface, directionality, horizontal vibration, symmetric vibration

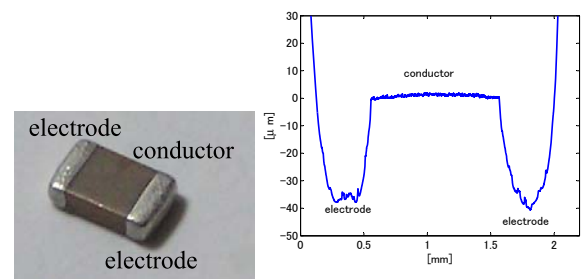
1. はじめに

筆者らは、基板実装用小型抵抗やコンデンサなど、数十～数百マイクロサイズの微小物体（マイクロパーツ）を輸送するための機構として、のこぎり歯形状のフィーダ表面を有するマイクロパーツフィーダを開発している [1]。この機構は、フィーダ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方向輸送を実現するシステムである。これらマイクロパーツの運動においては、体積に比例する重力や慣性力だけでなく、接触面積に比例する凝着力の影響を考慮する必要がある [2]。そこで、マイクロパーツの輸送において、凝着力の影響を考慮したダイナミクスを導出する。また、のこぎり歯表面のピッチを一定とし、仰角を変えた場合の輸送実験を行う。得られたダイナミクスを検証するために、ダイナミクスを用いてシミュレーションを行い、実験結果と比較する。

1.1 一方方向輸送原理

本研究で対象とするマイクロパーツは、積層セラミックチップコンデンサである。図 1 に、2012 型のセラミックコンデンサ（サイズ：2.0mm×1.2mm×0.6mm、質量：7.5mg）の外観および断面を示す。これらのセラミックコンデンサは、セラミック誘導体部とその両端に取付けられた外部電極により構成される。外部電極がセラミック誘導体部より約 40 μ m 突出していることがわかる。したがって、パーツフィーダ表面との接触は外部電極において発生する。また、外部電極に多くの凸部が存在することがわかる。これら外部電極の凸部が図 2(a) に示すように半径 r の半球面であると仮定し、凸部と図 2(b) に示すのこぎり歯が接触する場合を考える。このとき、のこぎり歯が左方向に動く場合にはのこぎり歯の傾斜側が接触する斜面接触が生じ（図 3(a)）、右方向に動く場合には、凸部とのこぎり歯

の先端が接触する先端接触が生じる（図 3(b)）。本研究では、この接触条件の違いを利用することにより、対称振動による一方方向輸送を実現している。すなわち、のこぎり歯が右へ運動している場合、マイクロパーツは先端接触によって右方向へ駆動し、左への運動時にはマイクロパーツはのこぎり歯の斜面をすべることになる。したがって、マイクロパーツには左右で異なった駆動力が生じ、マイクロパーツは右方向へ移動する。



(a) overview (b) surface profile

Fig.1 Ceramic capacitor 2012

2. 駆動力の解析

2.1 斜面接触

図 4(a) に示すように、凸部がのこぎり歯の斜面を F_0 の力で押す場合を考える。このとき、凸部はのこぎり歯の斜面を右方向へとすべる力が生じる。斜面接触の摩擦係数を μ_s 、斜面方向分力と法線方向分力をそれぞれ f_{rs} 、 f_{ns} とする、各方向分力は $f_{rs} = F_0 \cos \theta - \mu_s F_0 \sin \theta$ 、 $f_{ns} = F_0 \sin \theta$ であるから、凸部の x 方向駆動力 F_s は

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

となる。ただし、 $\cos \theta - \mu_s \sin \theta < 0$ のとき、斜面でのすべりが生じないため、 $F_s = -F_0$ となる。

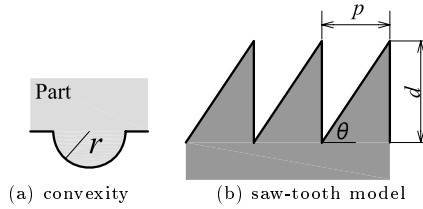


Fig.2 Contact model

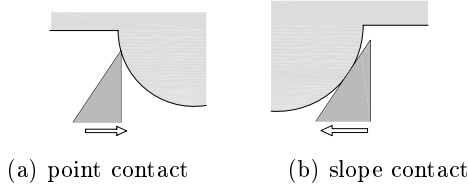


Fig.3 Two contacts between a micro-part and a saw-tooth

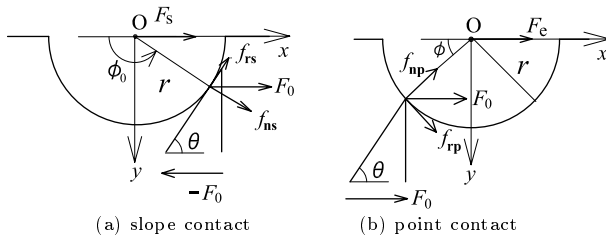


Fig.4 Statics of each contact condition

2.2 先端接触

図4(b)に示すように、のこぎり歯の先端が凸部を F_0 の力で押す場合を考える。先端接触の摩擦係数を μ_p とする。このとき、凸部の駆動力 F_e 力は、法線方向分力 $f_{np} = F_0 \cos \phi$ および接線方向分力 $f_{rp} = \mu_e f_{np}$ の x 軸方向分力の和で表される。すなわち

$$F_e = f_{np} \cos \phi + f_{rp} \sin \phi = F_0 \cos \theta (\cos \phi - \mu_e \sin \phi) \quad (2)$$

ただし、 $\sin \phi - \mu_e \cos \phi < 0$ のとき $F_e = 0$ となる。

2.3 接触状態の遷移

駆動力は、のこぎり歯と凸部の接触状態に応じて変化する。図5に示すように、2つののこぎり歯と凸部が接触する場合を考える。このとき、凸部とのこぎり歯との相対位置により、以下の接触が生じる。

1. $(K-1)$ 番目ののこぎり歯との先端接触、
2. 先端・斜面同時接触、
3. K 番目ののこぎり歯との斜面接触、
4. K 番目ののこぎり歯との先端接触。

凸部中心座標を $O(x, y)$ とし、 $(K-1)$ 番目および K 番目ののこぎり歯の先端座標をそれぞれ $S_{k-1} \equiv (x_{k-1}, y_{k-1})$, $S_k \equiv (x_k, y_k)$ とする。また、 ϕ_{k-1} を $(K-1)$ 番目ののこぎり歯との先端接触角、 ϕ_0 を斜面接触角とすると、それぞれの接触が生じる条件は以下のようなになる。

1. $x_{k-1} \leq x < x_{k-1} + r \cos \phi_{k-1}$,
2. $x = x_{k-1} + r \cos \phi_{k-1}$,

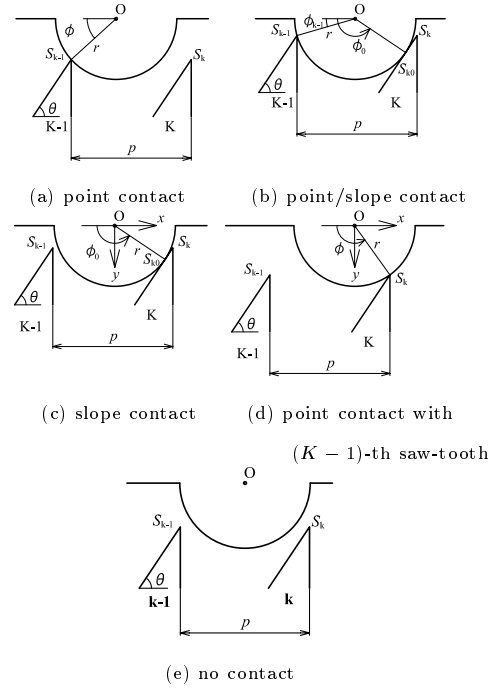


Fig.5 Contacts of a convexity and two saw-teeth

3. $x_{k-1} + r \cos \phi_{k-1} < x \leq x_k - r \sin \theta$,
4. $x_k - r \sin \theta < x \leq x_k$,

ここで、

$$\phi_{k-1} = \theta + \sin^{-1} \left(1 - \frac{p}{r} \sin \theta \right), \quad (3)$$

$$\phi_0 = \frac{\pi}{4} + \theta, \quad (4)$$

である。なお、図5(e)のように非接触状態では駆動力は発生しない。

次に、のこぎり歯のピッチと接触状態の関係について考える。のこぎり歯のピッチ p が $p > r(1 + \sin \theta) / \sin \theta$ であれば非接触状態が生じ、輸送効率が低下する。また、 $p \leq 2r \sin \theta$ のときには斜面接触が生じず、一方輸送が不可能となる。すなわちのこぎり歯のピッチは以下の条件が満たされるように選択する必要がある。

$$2r \sin \theta \leq p < r \frac{1 + \sin \theta}{\sin \theta}. \quad (5)$$

3. ダイナミクス

3.1 抗力を含むダイナミクス

マイクロパーツの質量を m 、速度を v 、粘性減衰係数を c とする。のこぎり歯表面から駆動力 F と抗力 F_d がマイクロパーツに伝わる場合のダイナミクスは以下の式になる。

$$F = m\dot{v} + cv + F_d. \quad (6)$$

3.2 凝着力に関する同定

のこぎり歯表面から伝わる抗力には、摩擦力だけでなく凝着力の影響が含まれる。凝着力は、のこぎり歯と凸部の接触条件により変化する。ここでは、図6に示す溝加工表面上にあるマイクロパーツの最大静止摩擦

力を推定することにより、のこぎり歯表面から受ける抗力の同定を行った。表 1 に、溝深さを $d_g = 0, 0.001, 0.003, 0.005, 0.007, 0.009, 0.01, 0.03, 0.07, 0.09$ mm とした場合の最大静止摩擦係数 $\mu(d_g)$ を示す。なお、最大静止摩擦係数は、それぞれの表面における摩擦角から推定した。これらの結果から、最小二乗法を用いて、摩擦係数に関する以下の同定結果を得た。

$$\frac{\mu(d_g)}{\mu(0)} = ae^{-\alpha \times d_g} + (1 - a), \quad (7)$$

ここで、 $a = 0.43$ 、 $\alpha = 2.3 \times 10^2$ である。また、 $\mu(d_g)/\mu(0)$ は無加工表面との摩擦係数比を示す。図 7 に、実験結果を \circ で示し、最小二乗法より得られた同定結果を実線で示す。

次に、凝着力の解析を行う。ここでは、表面から受ける抗力が、クーロン摩擦力によって生じる抗力と凝着力によって生じる抗力の和であると仮定する。本稿では、凝着力によって生じる考慮を「凝着摩擦力」と名付けた。重力加速度を g 、 μ_m をクーロン摩擦係数、 F_r を凝着摩擦力とすると、抗力 F_d は以下の式で表される。

$$F_d = \mu(d_g)mg = \mu_m mg + F_r. \quad (8)$$

Fig. 8(a) に示すように、 F_{ad} をパーツ表面と溝底面との間に生じる凝着力であるとする。パーツの奥行きを w とし、溝幅を dx とすると、溝底面の面積は $dS = w dx$ となる。このとき、 F_{ad} は溝底面の面積は dS に比例する。すなわち

$$F_{ad}(dS, d_g) = \beta(d_g)dS, \quad (9)$$

となる。なお $\beta(d_g)$ は比例定数である。

凝着摩擦力が凝着力に比例すると仮定する。 μ_{ad} を凝着摩擦係数とし、 $\Delta F_r(dS)$ を面積 dS の表面から受ける凝着摩擦力とする。このとき、以下の式が成り立つ。

$$\Delta F_r(dS) = \mu_{ad} F_{ad}(dS, d_g) = \mu_{ad} \beta(d_g) dS. \quad (10)$$

ここで、 $\mu_{ad} \beta(d_g)$ は面積 dS に対して独立である。

次に、図 8(b) で示される表面により生じる凝着摩擦力について解析する。この図において、表面の長さを p_n とし、パーツと表面の距離 d_g を x の関数で表すとす。このとき、表面全体から受ける凝着摩擦力は

$$F_r = \int_0^{p_n} \mu_{ad} \beta(d_g(x)) w dx = \mu_{ad} w \int_0^{p_n} \beta(d_g(x)) dx. \quad (11)$$

となる。式 (11) を、Fig. 6 で示される表面の場合に適用する。ここで、 $S_0 \equiv w p_n$ をマイクロパーツの表面積とする。無加工表面、すなわち $d_g = 0$ の場合、 F_r は次式ようになる。

$$F_r = \mu_{ad} w \int_0^{p_n} \beta(d_g(x)) dx = \mu_{ad} S_0 \beta(0). \quad (12)$$

式 (12) を式 (8) に代入すると、

$$\mu(0) = \mu_m + \frac{\mu_{ad} \beta(0)}{mg} S_0. \quad (13)$$

となる。同様に、図 6 において溝深さが d_g の時を考

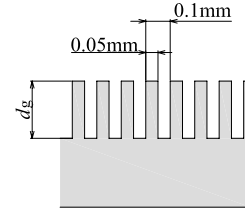


Fig.6 Cross-section of the fabricated surface

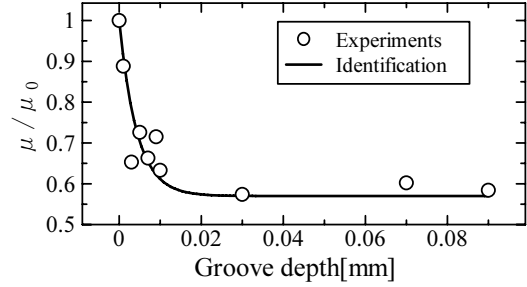


Fig.7 Identification of maximum static friction

える。このとき、表面積の 1/2 が無加工となる。すなわち、凝着摩擦力は以下の式となる。

$$\begin{aligned} F_r &= \mu_{ad} w \left\{ \int_0^{p_n/2} \beta(0) dx + \int_{p_n/2}^{p_n} \beta(d_g) dx \right\}, \\ &= \mu_{ad} \frac{S_0}{2} \{ \beta(0) + \beta(d_g) \}. \end{aligned} \quad (14)$$

式 (14) を式 (8) に代入すると

$$\mu(d_g) = \mu(0) - \frac{S_0 \mu_{ad} (\beta(0) - \beta(d_g))}{2 mg}. \quad (15)$$

となる。このとき、摩擦係数比 $\mu(d_g)/\mu(0)$ は次式で表される。

$$\frac{\mu(d_g)}{\mu(0)} \equiv 1 - \frac{S_0}{2} (\mu_g(0) - \mu_g(d_g)), \quad (16)$$

ここで、

$$\mu_g(d_g) \equiv \frac{\mu_{ad} \beta(d_g)}{\mu(0) mg}. \quad (17)$$

である。式 (7)、(16)、より、次式が導出される。

$$\mu_g(d_g) = \mu_g(0) - \frac{2a}{S_0} (1 - e^{-\alpha \times d_g}). \quad (18)$$

さらに、式 (17)、(18) を式 (11) に代入することにより、次式を得る。

$$F_r = \int_0^{p_n} \mu(0) mg \left\{ \mu_g(0) - \frac{2a}{S_0} (1 - e^{-\alpha d_g(x)}) \right\} w dx. \quad (19)$$

次に、図 9 に示されるのこぎり歯の凝着摩擦力について解析する。この場合の溝深さは次式で表される。

$$d_g(x) = d - \frac{d}{p} x \quad (20)$$

Table 1 Maximum static friction

depth [mm]	0	0.001	0.003	0.005	0.007
$\mu(d_g)$	0.98	0.87	0.64	0.71	0.65
depth [mm]	0.009	0.01	0.03	0.07	0.09
$\mu(d_g)$	0.70	0.62	0.58	0.61	0.57

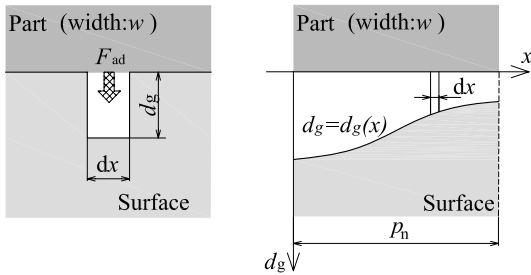
ΔF_s をのこぎり歯一枚から受ける凝着摩擦力とする．式 (20) を式 (19) に代入すると，

$$\Delta F_s = \mu(0)mg \left\{ \mu_g(0) - \frac{2a}{S_0} \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha d}}{\alpha d} \right) \right\} wp \quad (21)$$

となる．マイクロパーツに接触しているのこぎり歯の枚数を n_s とすると，マイクロパーツがのこぎり歯表面から受ける凝着摩擦力は次式となる．

$$F_r = n_s \Delta F_s \quad (22)$$

本稿では，式 (8)，(22) を式 (6) に代入することにより，凝着力を考慮したマイクロパーツの輸送シミュレーションを行う．



(a) small area (b) surface

Fig.8 Adhesion friction model

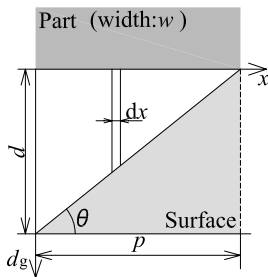


Fig.9 Model of adhesion force on saw-tooth

4. 仰角と速度の関係

4.1 輸送実験

のこぎり歯のピッチを $p = 0.01$ mm とし，仰角を $\theta = 15, 20, \dots, 40$ deg としたのこぎりは表面を用いた輸送実験を行った．それぞれの表面における輸送実験結果を図 10 に黒丸で示す．なお輸送時間の計測

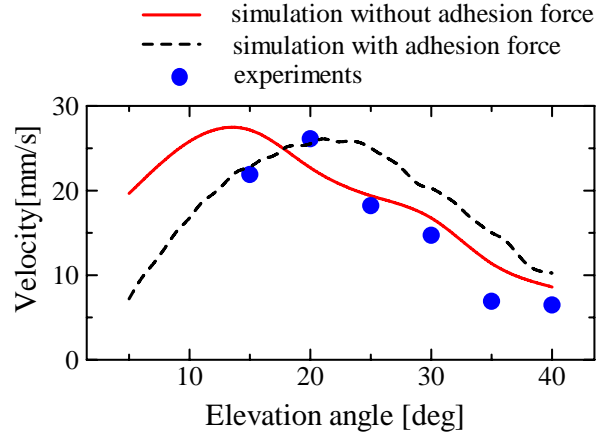


Fig.10 Experimental and simulation results

には 30fps のデジタルビデオカメラを用い，輸送にかかった時間をフレーム数から算出した．それぞれの表面において 30 回実験を行い，それらの平均値を実験値とした．

4.2 シミュレーション

前節で導出したダイナミクスを検証するために輸送シミュレーションを行い，実験値と比較した．のこぎり歯のピッチおよび凸部半径をそれぞれ $p = 0.1$ mm, $r = 0.05$ mm とし，サンプリングは 0.01 s とした．また，仰角を $\theta = 5$ deg から $\theta = 40$ deg まで変化させた．シミュレーション結果を図 10 に示す．凝着力を考慮しない場合およびする場合をそれぞれ実線および破線で示す． $\theta \leq 20$ deg においては，実験結果と凝着力を考慮したシミュレーション結果がよく一致しており， $\theta \geq 25$ deg においては，凝着力を考慮しない場合の方が誤差が少ない．しかし，どちらのシミュレーション結果も全体的に誤差を生じている．この原因としては，接触モデルが正確でないことが挙げられる．本研究においては，マイクロパーツ表面の凸部モデルを球面としてモデル化した．しかし実際の表面はより複雑であり，顕微鏡による実測データに基づいた表面モデルの導出が必要となる．

5. おわりに

本稿では，のこぎり歯形状を有するマイクロパーツフィーダにおいて，フィーダ表面から受ける凝着力を考慮したダイナミクスを導出した．得られたダイナミクスを用いてシミュレーションを行い，実験結果と比較した．

- [1] 三谷篤史，菅野直人，平井慎一：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日本機械学会論文集 (C 編)，Vol.71, No.704, (2005), pp.1169-1176
- [2] 安藤泰久，田中敏幸，伊能二郎，角田和雄：ナノメートルスケールの表面形状と摩擦力・引き離し力の関係，日本機械学会論文集 (C 編)，Vol.65, No.637, (1999), pp.3784-3791