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*

三 谷 篤 史^{*1}, 菅 野 直 人^{*1}, 平 井 慎 一^{*2}

Micro-Parts Feeding by a Saw-tooth Surface

Atsushi MITANI, Naoto SUGANO and Shin-ichi HIRAI^{*3}^{*3} Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University
1 1 1 Noji Higashi, Kusatsu shi, Shiga, 525-8577 Japan

This paper describes micro-parts feeding using a saw-tooth surface. In parts feeding, a driving force applied to each part must vary according to the moving direction of the part so that the part moves in one direction. Traditional feeders employ oblique vibration or asymmetric vibration of a feeder surface, which often causes unstable motion of micro-parts. In this paper, we propose micro-parts feeding using a saw-tooth surface with simple planar and symmetric vibration. First, we describe the principle of the proposed parts feeding. Contact model between a micro-part and a saw-tooth is then analyzed to formulate the condition for the feeding. Next, we show experimental results to examine whether the proposed method performs micro-parts feeding. Finally, we discuss how the feeding model explains experimental results.

Key Words: Saw-tooth Surface, Micro-Parts, Feeding, Directionality

1. は じ め に

近年、電子機器の小型化に対する要求や、携帯電話などモバイル機器の普及とともに、基板実装用小型抵抗・コンデンサなどのマイクロパーツが大量に生産・消費されている。マイクロパーツは出荷前の検査として、欠けやクラック、素体不良などによる不良品を選別するため、全6面の外観検査を行う。現在これらのプロセスは自動化されており、複数台のカメラによる外観検査を行う装置と、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行われている。

マイクロパーツのように微小かつ軽量の輸送対象物(ワーク)の接触運動においては、重力など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である⁽¹⁾。したがって、マイクロパーツフィーダには、凝着力に打ち克つための慣性力をパーツに伝えることが必要である。また、パーツをある一方向へ輸送するために、輸送方向に対する正方向と逆方向で異なった駆動力を与える必要がある。

本研究では、フィーダの表面にのこぎり歯形状の溝加工を施し、正負方向の接触条件を変えることによって、対称な平面振動を用いて一方向輸送を実現する方法を提案する。微小かつ軽量のワークの運動において

は、フィーダ表面から受ける力の影響が慣性力の影響よりも大きくなる。これらの点に着目すれば、振動式フィーダの入力信号波形や駆動周波数を変更するよりむしろ、ワークとフィーダ表面の接触条件を変更する方が、ワークの運動により大きな影響を与えられる。フィーダ表面に加工を施すことにより、フィーダとワークの接触面積が減少し、凝着力による影響の低減が期待できる。対称な駆動信号による振動を利用する場合、鋸波状波などの非対称駆動信号に比して高効率な駆動が期待できる。また、フィーダ表面形状によってパーツの運動を変えられれば、パーツフィーダの駆動周波数や振動振幅、機械的な傾きを変えることなくパーツの分離や整列が可能となる。

従来のパーツフィーダは、水平方向への振動だけでなく垂直方向への振動を利用しており、斜め振動や機械的な傾きを利用する方法⁽²⁾⁽³⁾や、水平方向と垂直方向それぞれに振動を与える方法⁽⁴⁾が提案されている。これらの方式では、垂直方向の振動によるワークの跳躍の問題がつきまとうため、安定な輸送を実現するためには、傾き角や駆動周波数の微調整が必要となる。また、正・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)~(8)}。これらは、鋸波状波や非正弦波など非対称な駆動信号やパルス信号を用いるため、駆動周波数を上げることが困難であり、対称波駆動に比してエネルギー効率が低く

* 原稿受付 2004年6月18日。

^{*1} 立命館大学理工学研究科(☎525-8577 草津市野路東111)。^{*2} 正員、立命館大学理工学部。

E-mail: amv23017@se.ritsumeikan.ac.jp

なる。表面に微小な加工を施すことにより、凝着力を低減する方法についての研究は行われている⁽⁹⁾。しかし、表面形状により輸送の方向性を得る方法については言及されていない。

本論文では、フィーダ表面としてののこぎり歯形状を適用し、方形波信号による水平振動を与えた場合のマイクロパーツの挙動を、実験的に明らかにする。

2. 輸送原理

パーツフィーダにおいて、ワークがある一方向へ運動するためには、フィーダ表面からワークに伝わる駆動力が正負方向で異なる必要がある。本章では、ワークであるマイクロパーツについて述べ、ワークとのこぎり歯形状表面との接触状態を仮定することにより一方向輸送の理論的検討を行う。

本研究で対象とするワークは、積層セラミックコンデンサである。図1にセラミックコンデンサの外観を、表1にTDK製Cシリーズコンデンサの仕様を示す。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。図2は、2012型の表面を接触式あらさ測定器で計測した結果である。外部電極がセラミック誘導体部より約 $40\mu\text{m}$ 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、外部電極の表面は平らでなく、多くの凹凸が存在することがわかる。

Fig. 1 Overview of ceramic condenser 2012

Table 1 TDK C series specification

Type	Size(t × w × h[mm ³])	Weight[mg]
0603	0.6 × 0.3 × 0.3	0.3
1005	1.0 × 0.5 × 0.5	1.2
2012	2.0 × 1.2 × 0.6	7.5
3216	3.2 × 1.6 × 0.85	23.0

ワークの外部電極表面に存在する凸部や凹部が、図3に示すように半径 r の円弧であると仮定し、パーツフィーダの表面が図4で示すのこぎり歯形状であると仮定する。のこぎり歯の仰角を、図4に示すように θ

Fig. 2 Surface shape of ceramic condenser 2012

Fig. 3 Surface profile model

Fig. 4 Saw-tooth surface model

Fig. 5 Point contact between micro-part and saw-tooth

で表す。パーツの凹凸部とフィーダ表面ののこぎり歯一枚との接触は、図5に示すような先端部分が接触する場合と、図6に示すような斜面側が接触する場合に分けられる。本研究の目的は、先端接触状態ではすべりを生じさせず、斜面接触状態においてのみすべりを

Fig. 6 Slope contact between micro-part and saw-tooth

生じさせることにより、一方向の輸送を行うことである。本章では、それぞれの接触状態において、フィーダからワークに伝わる駆動力の理論的検討を行うことにより、一方向輸送を実現するための条件を明らかにする。

図5に示す先端接触において、パーツフィーダの振動による駆動力を F_p とする。パーツの凹凸とのこぎり歯の接触点と、凹凸を示す円の中心を結ぶ直線が水平線と成す角を ϕ とする。このとき、ワークに伝わる力は、次式で示すように法線方向の分力 F_{np} と接線方向の分力 F_{rp} で表される。

$$F_{np} = F_p \cos \phi \quad (1)$$

$$F_{rp} = F_p \sin \phi \quad (2)$$

ここで、ワークが十分微小かつ軽量であり、慣性力の影響が凝着力の影響に比して十分小さいと仮定する。接触点における凝着力の影響を含む見かけの摩擦係数を μ_e とすると、ワークとのこぎり歯の間にすべりが生じない条件は、式(3)で与えられる。

$$F_{rp} - \mu_e F_{np} = F_p \sin \phi - \mu_e F_p \cos \phi < 0 \quad (3)$$

同様に、図6の斜面接触において駆動力を F_b とすると、ワークに伝わる力は、斜面の法線方向の分力 F_{nb} と水平方向の分力 F_{rb} で表される。

$$F_{nb} = F_b \sin \theta \quad (4)$$

$$F_{rb} = F_b \cos \theta \quad (5)$$

接触点での摩擦係数を μ_s とすると、すべりの生じる条件は以下の式で表される。

$$F_{rb} - \mu_s F_{nb} = F_b \cos \theta - \mu_s F_b \sin \theta > 0 \quad (6)$$

したがって、パーツフィーダ表面ののこぎり歯形状とワークの表面との接触状態が、式(3)と式(6)の条件、すなわち

$$\mu_e > \tan \phi \quad (7)$$

Fig. 7 Linear partsfeeder using bimorph piezoelectric actuators

$$\mu_s < \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \quad (8)$$

を同時に満たしたときに一方向輸送が実現する。

次に、輸送の方向性が得られない場合について考える。式(3)が満たされない場合、すなわち

$$\mu_e < \tan \phi \quad (9)$$

のとき、先端接触においてすべりが生じる。しかし、図5(a)に示す凹部での接触では接触位置の角度 ϕ が減少していき、最終的に $\mu_e > \tan \phi$ が満たされるので、すべりの生じない条件での駆動となる。また、図5(b)に示す凸部の接触においては、 ϕ が増加する方向へすべり、 $\phi = 90^\circ$ を超えた時点で非接触運動へと移行する。しかし、隣ののこぎり歯の先端が突起に接触し、すべりの生じない条件へ移行する。ただし、パーツフィーダの振幅が十分でない場合には、すべり状態からすべりの生じない運動状態への移行が行われにくく、輸送効率が低下する。また、式(8)より、

$$\theta > \tan^{-1} \frac{1}{\mu_s} \quad (10)$$

となる θ を選択した場合には斜面接触点でのすべりが生じず、輸送の方向性が得られない。

次章以降では、パーツフィーダ表面の加工による見かけの摩擦力の変化を摩擦角計測実験により明らかにし、のこぎり歯の仰角やフィーダの振動数を変えた場合のワークの運動を実験により確かめる。

3. 実験装置

3.1 パーツフィーダ駆動装置 図7および図8に実験装置の写真および駆動システムの概略図を示す。駆動用アクチュエータとして、バイモルフ型圧電素子を2枚用いる。一端を固定端支持としたバイモルフ型

Fig. 8 Driving system of the proposed mechanism

Fig. 9 Two types of surface shape of silicon wafer

圧電素子の屈曲振動を、ベアリングを用いた回転端を介してフィーダテーブルに伝達し、フィーダテーブルの往復運動として得る機構である。フィーダテーブルは、振動が同一直線上に限定されるようにリニアガイドに固定されている。また、バイモルフ型圧電素子の固定端側には、屈曲振動による長手方向の変位に対する補償機構を備えている。駆動信号源として関数発生器を用い、メスチック製の圧電アクチュエータ駆動用増幅器により 30 倍に増幅し、圧電素子へ電圧を印加する。フィーダ表面には、表面加工を施したシリコンウェハを用いる。

3.2 フィーダ表面 本論文では、パーツフィーダ表面として、のこぎり歯形状に加工したシリコンウェハを用いる。シリコンウェハの加工には、ディスコ製のダイシングソーを用いた。ダイシングソーは、円形のダイヤモンドブレードを高速回転させ、加工点

Fig. 10 Relationship between friction and groove depth of parts feeder

に冷却水をかけながら切断・溝掘りを行う装置で、ミクロン単位の加工精度が得られるという特徴を持つ。本研究では、のこぎり歯形状を形成するために三角形のブレードを用いて加工を行った。この場合、加工条件によって図 9(a)(b) に示される 2 つの形状が得られる。ここで、 p はブレードの送り幅 (ピッチ)、 l は切り込み長さ、 d は溝深さ、 θ は溝の仰角であり、 $p = l$ の時に表面は図 9(a) に示すのこぎり歯形状に、 $p > l$ の時に図 9(b) に示す台形形状になる。

4. 基礎実験

4.1 溝加工による摩擦低減効果 マイクロトライボロジにおいては、摩擦力は垂直荷重と凝着力の和に比例する⁽¹⁰⁾。ファンデルワールス力に起因する凝着力は、実際に接触していない部分において、2 面間の距離すなわち溝深さに反比例する⁽¹¹⁾。そこで、接触面積を一定に保持したまま溝深さを変更し、そのときの 2012 型の摩擦角を計測することにより凝着力の変化を確かめる。ここでは、図 9(b) の表面において、 $p = 0.1\text{mm}$ 、 $l = 0.05\text{mm}$ 、 $\theta = 90^\circ$ とし、溝深さを $d = 0\text{mm}$ から 0.09mm まで変化させた。図 10 に、横軸に溝深さ、縦軸に各溝深さでの摩擦角 μ と未加工のシリコンウェハにおける摩擦角 μ_0 との比 μ/μ_0 をとった場合の計測結果を示す。溝深さ 0.001mm で摩擦角は未加工時の約 90 %、 0.01mm で約 70 % となり、その後はほぼ一定である。従って、接触面積を 50 % にした場合には最大 30 % の摩擦低減効果が得られ、凝着力による影響を排除するには 0.01mm 以上の溝深さが必要であることがわかる。

4.2 方形波駆動時の周波数-変位曲線 圧電素子への印加電圧として $V_{p-p} = 180\text{V}$ の方形波を与えた場合のパーツフィーダの周波数-変位特性を図 11 に示す。10Hz 駆動での変位は約 5mm であり、15Hz で

Fig. 11 Relationship between PZT driving frequency and feeder displacement

Table 2 Surface shape parameter

Type	30°	60°
θ [deg]	30	60
p [mm]	0.1835	0.0557
l [mm]	0.1835	0.0557
d [mm]	0.1250	0.1250

は10Hzの約40%, 30Hzでは約10%に低下している。すなわち、周波数を上げるにつれて振動振幅が低下することがわかる。

5. 輸 送 実 験

本章では、表2に示すフィーダ表面を用いて輸送実験を行う。以下では、2012および1005のワーク輸送の方向性を確認し、その後それぞれのワークについて輸送実験を行う。

5.1 輸送の方向性 本研究では、ワークの凹凸によりワークが一方へ輸送されることを確認するために、凹凸のない試験用ワークとして2.0mm×1.0mm×0.5mmのシリコンウェハ片を用い、セラミックコンデンサとの運動を比較する。フィーダ表面には表2の30°タイプを使用し、駆動信号の電圧を120V、周波数を15Hzとし、のこぎり歯形状の傾斜面が奥行き側の場合(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度カメラ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、連続写真加工を行った結果を図12(a)(b)に示す。なお、Aは1005、Bはシリコンウェハ片、Cは2012である。正方向において、1005、2012はそれぞれ一方輸送が実現されているのに対し、シリコンウェハ片は前進と後退を

(a) positive direction

(b) negative direction

Fig. 12 Directionality of feeding

繰り返し、輸送距離は1005の約半分となった。また負方向においても、1005、2012は一方輸送が実現されているのに対し、シリコンウェハ片は同一方向へ運動を開始した直後に後退し、最終的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ェ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輸送が実現されることを確認した。

5.2 2012型の輸送実験

5.2.1 30°表面を用いる場合 フィーダ表面として、表2に示す $\theta = 30^\circ$ のシリコンウェハを用いて、2012型のワークの輸送実験を行った。10Hz駆動時での実験結果を図13(a)(b)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、輸送は不安定である。逆方向についても同様に輸送方向の反転が生じている。

15Hz駆動の場合を図14(a)(b)に示す。ここでは約4秒間撮影した。正負方向どちらとも良好な実験結果が得られた。また、シリコンウェハの配置によってワークの輸送方向が反転することが確認された。

図15(a)(b)に、30Hz駆動時において約8秒間撮影

(a) positive direction

(b) negative direction

Fig. 13 2012 Motion at 10Hz square wave on $\theta = 30^\circ$ surface

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も存在する。

5.2.2 60° 表面を用いる場合 フィーダの表面を $\theta = 60^\circ$ のシリコンウェハに変更し、前項の輸送実験でもっとも良好な結果が得られた 15Hz 駆動と同一の駆動条件で実験を行った。約 2 秒間の撮影結果を図 16(a)(b) に示す。正方向においては、ワーク 2 のみが約 2 秒で一番下まで到達している。また、ワーク 3 は輸送中に回転しているのがわかる。ワーク 2 においては半分程度の輸送しか行えていない。負方向においては、シリコンウェハの反転にもかかわらず、ワーク 1 は下方向に進んでいる。ワーク 2, 3 は上方向に進んでいるもののほとんど輸送されていない。従って、 $\theta = 60^\circ$ のシリコンウェハでは輸送の方向性は得られなかった。

5.2.3 考察 5.2.1 項の実験では、15Hz での駆動がもっとも良好な結果が得られた。しかし、3cm の

(a) positive direction

(b) negative direction

Fig. 14 2012 Motion at 15Hz square wave on $\theta = 30^\circ$ surface

輸送に 4 秒以上かかっており、速度の面では十分ではない。したがって、より良好な輸送条件が得られる駆動条件や表面形状の検討を行う必要がある。10Hz 駆動では跳躍や回転などの運動がワークに生じ、安定した輸送が行えなかった。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が発生し、ワークの先端が浮き上がる現象が起きたと考えられる。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、2 章で述べたすべりを生じない接触状態への移行が行われず、良好な輸送条件が得られていないと考える。

5.2.2 項の実験では、いくつかのワークにおいて 5.2.1 項の実験よりも高速な輸送が実現できている一方で、運動の方向性は得られなかった。高速輸送が可能な理由は、 $\theta = 60^\circ$ の表面が $\theta = 30^\circ$ に比して凝着力の影響が小さいためである。また、運動の方向性が得られなかった理由としては、 $\theta = 60^\circ$ では式 (10) が成り立

(a) positive direction

(b) negative direction

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

(a) positive direction

(b) negative direction

 Fig. 16 2012 Motion at 15Hz square wave on $\theta = 60^\circ$ surface

ち、斜面接触点でのすべりが生じなかったためであると考えられる。

5.3 1005 型の輸送実験

5.3.1 30° 表面を用いる場合 次に、2012 より小型かつ軽量の 1005 型のパーツの輸送実験を行った。実験の条件は 5.2.1 項の 15Hz 駆動時と同一である。また、フィーダ表面として 30° のシリコンウェハを用いた。約 5 秒間撮影した結果を図 17(a)(b) に示す。

この場合においてもシリコンウェハの向きによって運動の方向が変わっていることがわかる。正方向においては、すべてのワークにおいて左右への運動が生じており、ワーク 3 は他のワークに比べて輸送距離が小さい。逆方向においては、ワーク 1, 2 が直線的に運動しているが、輸送距離にばらつきが生じている。

5.3.2 考察 この実験に用いたワークである 1005 型は、前項にて用いた 2012 型よりさらに小型かつ軽量であり、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。

5.2.1 項の 15Hz 駆動との比較を行うと、2012 型に比べて低速な駆動になっている。これは、1005 型が 2012 より小型かつ軽量なために、フィーダの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と思われる。また、輸送時の左右への運動は、パーツの個体差やシリコンウェハの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察される。

6. お わ り に

本研究では、パイル型圧電素子を用いた振動式パーツフィーダを開発し、フィーダ表面にのこぎり歯型の溝加工を施すことによりワークの運動に方向性を持たせる方法を提案した。フィーダ表面に $\theta = 30^\circ$ と 60° のシリコンウェハを用い、アクチュエータの駆動信号として方形波を用いた場合の 2012 型の積層セラ

(a) positive direction

(b) negative direction

Fig. 17 1005 Motion at 15Hz square wave on $\theta = 30^\circ$ surface

ミックコンデンサの輸送実験を行い以下の結果を得た。

- $\theta = 30^\circ$ の表面において、ワークの運動に方向性が見られた。
- $\theta = 60^\circ$ では運動の方向性は得られなかったが、一部のワークにおいて $\theta = 30^\circ$ より高速な輸送が実現できた。
- 10Hz の駆動ではワークの回転や跳躍が生じ、また、30Hz の駆動ではワークがほとんど運動しなかった。

また、 $\theta = 30^\circ$ のフィーダ表面を用いて 1005 型の輸送実験を行い、以下の結果を得た。

- 15Hz 駆動において、運動の方向性が確認された。
- 2010 の 15Hz 駆動に比して低速であり、運動にばらつきが生じた。これは 2012 型に比して接触条件の変動に影響を受けやすいためであると考えられる。

今回の実験において、1005 型の運動にばらつきが生じた原因としては、パーツの個体差の他に、シリコ

ンウェハの加工精度によるものも考えられる。実際、のこぎり歯の先端高さに最大 $4\mu\text{m}$ の誤差を有していることを確認している。今後の課題としては、(1) より高精度な加工法の検討、(2) 接触状態の正確な把握、(3) アクチュエータの駆動電圧および周波数の検討、(4) 一方向輸送の条件の理論的検討、などが挙げられる。最終的には、同一フィーダ上での輸送速度の変更を実現したい。

文 献

- (1) 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, (1999), pp.409-413
- (2) 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), 35 巻, 279 号, (1969), pp.2183-2189
- (3) Peter Wolfsteiner and Friedrich Pfeiffer: *The Parts Transportation in a Vibratory Feeder*, IUTAM Symposium on Unilateral Multibody Contacts, (1999), pp.309-318
- (4) Peter U. Frei: *An Intelligent Vibratory Conveyor for the Individual Object Transportation in Two Dimensions*, Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, (2002), pp.1832-1837
- (5) W.A. Morcos: *On the Design of Oscillating Conveyors -Case of Simultaneous Normal and Longitudinal Oscillations-*, ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.92, No.1, (1970), pp.53
- (6) 石坂昭夫, 木村幹雄, 小滝富雄: 高次振動を利用した振動輸送機, 精密機械, Vol.39, No.1, (1973), pp.93
- (7) 井沢実, 野崎卓二: 複合振動板による振動輸送の研究 (第 1 報), 精密機械, Vol.41, No.5, (1975), pp.453
- (8) Winnicy Y. Du, Stephen L. Dickerson: *Modelling and Control of A Novel Vibratory Feeder*, Proceedings of the 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, September 19-23, (1999), Atlanta, USA, pp.496-501
- (9) 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
- (10) Yasuhisa Ando, Jiro Ino: *The Effect of Asperity Array Geometry on Friction and Pull-Off Force*, Transactions of the ASME, Vol.119, (1995), pp.781-787
- (11) 安藤泰久: マイクロトライボロジー, 精密工学会誌, Vol.67, No.12, (2001), pp.1916-1919