フェムト秒レーザ・ダブルパルス加工による非対称表面を用いた
マイクロパーツの輸送*三 谷 篤 史^{*1}, 平 井 慎 一^{*2}Feeding of Submillimeter Microparts along an Asymmetric Surface
Fabricated by Double-Pulsed Femtosecond Laser ProcessAtsushi MITANI^{*3} and Shinichi HIRAI^{*3} Department of Design, Sapporo City University,
1 Geijyutu-no-mori, Minami-ku, Sapporo-shi, Hokkaido, 005-0864 Japan

Femtosecond laser technology has the ability to form stable minute grating structures on various materials, including silicon and stainless steel. By forming a periodic structure on a surface where contacts parts, the tribology characteristics can be improved, because the effect of adhesion decreases as the contact area reduces. Application of a double-pulsed femtosecond laser irradiation can generate periodic structures with asymmetric profiles. We previously showed that microparts, such as ceramic chip capacitors and resistors, can be fed along asymmetric surfaces using simple planar symmetric vibrations. Microparts move in one direction because they adhere to these surfaces asymmetrically. In this study, we tested the ability of an asymmetric surface microfabricated by the double-pulsed femtosecond laser irradiation to feed 0402 capacitors (size, $0.4 \times 0.2 \times 0.2$ mm; weight, 0.1 mg). Among the characteristics evaluated were the differences in profiles of the two inclined surfaces, the effect of decreased adhesion, the coefficient of friction in both the forward and the backward directions, and the friction angle of the 0402 capacitors in both directions. Using the results of feeding experiments of these capacitors, we assessed the feeding velocity and the feeding stability. Simulating microparts feeding using dynamics including adhesion based on measurements, we studied validity of the dynamics derived.

Key Words: Asymmetric Surface, Microparts, Unidirectional Feeding, Femtosecond Laser Process

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、数十から数百ミクロンサイズの微小物体(マイクロパーツ)を輸送する機構として、非対称形状に加工したフィード表面を用いたマイクロパーツフィードを提案している⁽¹⁾。フィード表面にのこぎり歯形状など非対称形状の微細加工を施し、マイクロパーツとフィードの接触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(図1)。

本稿では、フェムト秒レーザ・ダブルパルス加工⁽²⁾により得られた非対称表面を、0402型セラミックチップコンデンサ($0.4 \times 0.2 \times 0.2$ mm, 0.1 mg)の輸送に適用する。フェムト秒レーザ・ダブルパルス加工とは、フェムト秒レーザ照射で自己組織的に誘起されるサブミク

ロンピッチの微細な周期溝を、入射角を設けたうえでダブルパルス形成する手法である。フェムト秒レーザは、レーザアブレーション、すなわち、レーザ照射により物体が加熱されて蒸発に至るまでの過程において、金属内部への熱伝導による損失がない(非熱的過程)という特長がある⁽³⁾。これは、レーザのパルス幅がピコ秒よりも短い場合に見られる。この場合、物体に照射されたレーザが加工対象部位にのみ作用し、それ以外の部分への熱伝導がなく融解層が形成されないため、微小な周期構造を高精度に生成するのに適している。はじめに、フェムト秒レーザ・ダブルパルス加工表面の非対称性を実測データに基づいて検証する。次に、表面性測定機を用いて摩擦係数を測定するとともに、マイクロパーツの摩擦角を計測することにより、加工表面の摩擦特性を検証する。特に、摩擦の非対称性を検証するために、正負方向それぞれについて計測し、それらの結果を比較する。また、実測データに基づくマイクロパーツとフィードの表面形状モデルを用いて凝着モデルを導出し、それらの凝着モデルを含むマイ

* 原稿受付 2009年4月8日。

^{*1} 正員, 札幌市立大学デザイン学部(☎ 005-0864 札幌市南区芸術の森1)。^{*2} 正員, 立命館大学理工学部(☎ 525-8577 草津市野路東1-1)。

E-mail: a.mitani@scu.ac.jp

クロパーツのダイナミクスモデルを導出する。最後に、輸送実験を行うことにより、フェムト秒レーザー加工表面の輸送特性を明らかにする。また、動特性モデルを用いたシミュレーション結果と実験結果を比較し、ダイナミクスモデルの妥当性を検証する。

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⁽⁴⁾⁽⁵⁾や、水平方向と垂直方向それぞれに振動を与える方法⁽⁶⁾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の慣性力を得る方法が提案されている^{(7)~(9)}。これらは、鋸波状波や非正弦波、パルス信号など非対称な駆動信号を用いるため、駆動周波数を上げることが困難である。筆者らの開発しているパーツフィーダは、水平な平面内での対称振動による一方向輸送を実現しており、従来の機器に比してセットアップが容易である。また、対称振動を利用したシステムの方が共振周波数での駆動に適しているため、駆動周波数を共振周波数付近になるように調整することにより、エネルギー効率の高い駆動が期待できる。

微小なパーツの操作を行うために、Micro-electro mechanical system(MEMS)を用いた機能性表面が開発されている。パーツと接触する表面に微細周期加工を施すことにより、摩擦力や引き離し力が減少することが報告されている⁽¹⁰⁾。本研究においても、フィーダ表面の微細加工による凝着力低減効果が期待できる。エアフローを用いた輸送⁽¹¹⁾では、輸送システムの表面に微小なエアノズル群の開閉により空気の流れを制御し、パーツの微細な操作を実現する。特に、パーツと表面間に生じる凝着力や摩擦力を低減するために、物体浮遊用ノズルが設置されている。これらの機構においては、エアノズルの形状寸法や配置についての検討が必要であり、目的とする操作を実現するためのノズル制御が最重要課題となる。また、MEMSを用いてせん毛状に加工したポリイミドのぜん動運動により、パーツとの接触を変化させパーツ操作を実現する機構⁽¹²⁾や、フィーダ表面に微小なアクチュエータアレイを構築することにより力ベクトルフィールドを形成する方法が提案されている⁽¹³⁾。これらは、それぞれのアクチュエータを制御することにより、輸送対象物との接触条件を変化させる方法である。それらに対して、筆者らはフェムト秒レーザー・ダブルパルス加工を用いて非対称な接触特性を有する機能性表面を形成し、水

Fig. 1 Diagram of the microparts feeder using a sawtooth surface with simple planar and symmetric vibration

平な対称振動による一方向輸送を実現する。この場合、接触はフィーダ表面の性状に依存する一方で、駆動システムが簡略化されるという特長を持つ。

本論文の目的は、マイクロパーツを輸送する場合において、凝着力がパーツの輸送特性におよぼす効果を定式化し、それらを含むダイナミクスを定義することである。

2. フェムト秒レーザーダブルパルス加工表面

非対称な表面形状を得るために、単軸のフェムト秒レーザーをビームスプリッターで2分割し、片側に50psの遅延を設けて入射角20°で照射した。第1パルスの照射による材料の蒸散が開始すると同時に、第2パルスを照射し蒸発粒子を再加熱することで、反跳力が第2パルスの入射角方向にシフトする。これらの作用を利用して、周期的な非対称凸部を有する表面を生成した。材料は、厚さ0.5mm、幅10mm、長さ40mmのステンレス材である。AFMを用いて撮影した加工表面を見ると、加工表面には凸部が周期的に現れている(図2)。これらのAFM画像を、走査型顕微鏡写真解析ソフトGwyddionを用いて解析した。加工表面に生成された凸部の周期は0.92μm、溝深さは0.17μmであり、凸部高さのばらつきは0.025μmであることがわかった(図3)。

次に、凸部の非対称性を検証する。水平方向の位置を x 、垂直方向の高さを y で表し、任意の凸部における表面形状(図4)を、方程式 $y(x)$ で表す。方程式 $y(x)$ は一般性を失うことなく表面形状の極大点を座標原点に一致させることができる、すなわち、 $y(0)=0$ 、 $y'(0)=0$ となるように変形できると仮定する。ここでは特に、4次の線形多項式

$$y(x) = a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2, \quad (1)$$

を適用する。近似曲線の一例を図5に示す。なお、近

Table 1 Approximation function coefficients of feeder surface (μm)

a_4	a_3	a_2
-2.97	-4.75	-2.24

Fig. 2 Micro-fabricated surface profile, as shown by the atomic force microscope (AFM)

似式においては、左から $0.2\mu\text{m}$ 付近にある突起を無視した近似モデルとなっている。実際のフィーダ表面モデルは、式 (1) で表される凸部形状が一定の周期で並んだものとなり、無視された突起は溝の底に存在している。ここでは、フィーダとパーツの接触は凸部の頂点周りで生じ、谷の底にある突起とは接触せず、パーツの運動やフィーダ表面の非対称性には影響をおよぼさないと仮定している。近似曲線の算出においては、凸部形状を一般の 4 次式で近似し、近似式の極大点が原点に一致するように座標を平行移動することにより、式 (1) の表現を得た。任意に選択した 8 個の凸部を式 (1) で近似し、各項の係数を平均化したものをフィーダ表面に生成された凸部形状モデルとして定義する。凸部形状モデルの各係数を表 1 に示す。このモデルの一階微分方程式より、極大値の両側における傾きを計算することにより、凸部の非対称性を検証する。 $x = -0.25\mu\text{m}$ における傾きは $y' = 0.415$ であるのに対し、 $x = 0.25\mu\text{m}$ では $y' = -2.19$ となっており、極大値の左側傾斜が右側傾斜に対して約 20% となっている。したがって、加工表面の凸部は duty 比 32% の非対称性を有している。

3. 摩擦の方向性

3.1 表面性測定機による摩擦係数の測定 フェムト秒レーザ・ダブルパルス加工表面の摩擦係数を測定するために、摩擦摩耗試験システム **Heidon Tribogear Type:hhs2000**(新東科学株式会社)を用いた。本システムは、先端が球形の引掻針を一定の荷重で測定対象表

Fig. 3 Periodicity of the micro-fabricated surfaces

Fig. 4 Profiles of convexities on the micro-fabricated surface

Fig. 5 Approximation functions of convexities

面に押しつけながら、一定の速度で移動させたときの反力を計測することにより、測定対象表面の摩擦係数を推定する。計測に使用した引掻針の詳細および駆動パラメータを表 2 に示す。なお、引掻針の送り速度は $t = 0\text{s}$ でステップ的に変化させた。摩擦の方向性を検証するために、引掻針が表面上を左から右に移動する場合（正方向とする）、および右から左に移動する場合（負方向とする）それぞれについて反力を計測した (図 6)。これらの結果から、摩擦係数は正方向が

Table 2 Parameters of the friction tester TRIBOGEAR

probe	
material	sapphire
point radius	0.05 mm
test parameter	
load	100 g
velocity	10 mm/s

$\mu_{\text{pos}} = 0.304$, 負方向が $\mu_{\text{neg}} = 0.329$ となった. すなわち, フェムト秒レーザ・ダブルパルス加工表面の摩擦係数は, 7.6 % の非対称性を有している.

Fig. 6 Time history of resistance when the probe moves on the surface with a constant velocity

3.2 摩擦角計測による非対称性検証 マイクロパーツとして 0402 型セラミックチップコンデンサを適用した. 加工表面にマイクロパーツを載せた状態で加工表面を傾けていき, マイクロパーツが落下したときの傾斜角 ϕ を計測した. ここでは, 摩擦の非対称性を検証するために, 正方向および負方向それぞれについて計測した. また, フェムト秒レーザ・ダブルパルス加工による摩擦の低下を検証するために, 未加工

表面についても摩擦角を計測した. 一方, サブミリ以下のスケールを有するマイクロパーツの運動においては, 慣性力だけでなく, フィーダ表面との摩擦力や凝着力の影響も受ける. 凝着力は, マイクロパーツとフィーダ表面の接触条件により変化する⁽¹⁴⁾. セラミックコンデンサは電子部品であるため, 導電性の高い材料が使用されている. 特にフィーダ表面と接触する外部電極は, 銅やニッケルで構成されている. したがって, セラミックチップコンデンサの外部電極には静電気が蓄積されにくい性質を有しており, 静電気力が発生しにくいと考えられる⁽¹⁵⁾. また, パーツをフィーダ表面に置く際の接触帯電を低減するために, キーエンス製の除電器を利用しており, また, チップの操作には静電気対策がなされた ESD ピンセットを使用している. 実験を実施する前に, 湿度変動による静電気力の変化を低減するために, 湿度の制御が可能な実験用設備を用意し, 実験装置とパーツをその中に 1 日間放置した. なお, 温度は 24℃ とし, 湿度を 50 %, 60 %, 70 % とした. 実験はそれぞれ 35 個のマイクロパーツを用いて 3 回ずつ行った. マイクロパーツの一部は, 加工表面の傾斜角が $\phi = 90^\circ$ を超えても落下しなかったため, $\phi < 90^\circ$ で落下したマイクロパーツの個数 (図 7) およびそれらの摩擦角の平均値 (図 8) を実験結果とした.

はじめに, 加工による凝着力低減効果を検証する. 落下個数を比較すると, 湿度にかかわらず加工表面の方が未加工表面よりも多く, また, 摩擦角は加工表面に比して未加工表面の方が大きくなっている. これは, 未加工表面における凝着力の影響が大きいことを示しており, フェムト秒レーザ加工による凝着力低減効果が得られた.

次に, 摩擦の方向性を検証する. 各湿度環境下において, 正方向および負方向の摩擦角を比較すると, 湿度 50 % においては 1.6 %, 湿度 60 % においては 24 %, 湿度 70 % においては 14 %, 負方向の摩擦角が大きくなっている. したがって, 湿度にかかわらず摩擦の非対称性が生じているのがわかった.

最後に, 湿度が摩擦におよぼす影響を検証する. 湿度が上昇するにしたがい, 落下個数は減少しているのにたいし, 摩擦角は上昇している. これは, 湿度が高ければ高いほど凝着力の効果が増大し, パーツがフィーダ表面から分離しにくくなっていくことを示している.

4. フィーダ表面とマイクロパーツの接触解析

4.1 マイクロパーツ表面のモデル化 顕微鏡システムとしてユニバーサルズーム顕微鏡 Multizoom

Fig. 7 Number of capacitors that fell from the micro-fabricated surface in 105 capacitors

Fig. 8 Average friction angle of fallen capacitors: capacitors that adhered were not considered

az100(ニコンインステック)を用いた。顕微鏡には、垂直視による画像取得が可能なモノズーム光学系が採用されている。顕微鏡は最大倍率8倍の内蔵ズームを備えており、倍率5倍までの対物レンズを組み合わせて使用することにより、最大倍率40倍での撮影が可能である。顕微鏡の上部には、顕微鏡画像を撮影するためのデジタルカメラが取り付けられており、撮影された画像はUSBインターフェイスを介して計算機に転送される。なお、倍率40倍にて撮影された画像の分解能は $0.276\mu\text{m}/\text{pixel}$ である。セラミックチップコンデンサは、導電体とその両端の電極から構成されている(図9)。これらの写真をGwyddionで分析した結果を図10に示す。電極部は導電体から約 $8\mu\text{m}$ 突出しており、フィード表面との接触は電極部で生じる。また、電極部には多数の凸部が存在しており、フィード表面との接触を高精度に解析するには、凸部の詳細なモデルが必要となる。ここでも第2章と同様に、水平方向の位置を x_p 、垂直方向の高さを y_p で表し、パーツ凸部形状を方程式 $y_p(x_p)$ で表す。方程式 $y_p(x_p)$ は一般性を失うことなく $y_p(0)=0$ 、 $y_p'(0)=0$ となるように変形できると仮定する。ここでは以下の2次多項式を用いた。

$$y = bx^2 \quad (2)$$

図11に任意の凸部形状とその近似モデルを示す。パーツ表面における任意の凸部を8点選択し、それらの係数の平均値をとることにより、 $b = -1.75$ を得た。最終的に凸部表面モデルは、式(2)で表されるモデルを、

Fig. 9 Picture of a 0402 capacitor

Fig. 10 Surface profile of 0402 capacitor

Fig. 11 Convexity on the surface of 0402 capacitor and its approximation

y 軸周りに回転させた双曲面によって定義される。極小値を原点としたパーツ座標系 $O_p - x_p y_p z_p$ において、式(2)上の任意の点 (x_p, y_p) を y_p 軸周りに回転させた場合の軌跡は、半径 $r = x_p = \sqrt{y_p/b}$ の円となる。すなわち、凸部表面形状を表す方程式は

$$x_p^2 + z_p^2 = y_p/b \quad (y_p > 0) \quad (3)$$

となる。

4.2 接触解析 図12に示すように、それぞれ式(1)および(2)で表される表面近似モデルが接触する場合を考える。この図において、式(1)の極大値を原点とするフィード表面座標系 $O - xyz$ および式(2)の極小値を原点とするパーツ表面座標系 $O_p - x_p y_p z_p$ を定義

Fig. 12 Contact of surface models

した。なお、 z 軸および z_p 軸はそれぞれ xy 平面および $x_p y_p$ 平面に垂直な軸である。2つの表面がフィード表面座標系における座標 $C(x_c, y_c)$ で接触する場合を考える。このとき、これらの表面モデルは接点 C において接線を共有する。フィード表面座標系 $O-xyz$ の xy 平面上において、パーツ座標系の原点座標を ${}^oO_p(x_0, y_0)$ とすると、式 (2) は以下のように書き換えられる。

$$y = b(x - x_0)^2 + y_0 \quad (4)$$

すなわち、接点 C における接線の方程式は

$$y = 2b(x_c - x_0)(x - x_c) + y_c \quad (5)$$

となる。接線の傾きを $y'(x_c) \equiv \tan \theta$ とすると、

$$y'(x_c) = \tan \theta = 2b(x_c - x_0) = f'_s(x_c) \quad (6)$$

$$f'_s(x_c) \equiv \frac{df_s(x)}{dx} = 4a_4x^3 + 3a_3x^2 + 2a_2x \quad (7)$$

である。これらの式を解くことにより、パーツ座標系の原点 ${}^oO_p(x_0, y_0)$ は以下のように求まる。

$$x_0 = x_c - \frac{f'_s(x_c)}{2b} \quad (8)$$

$$y_0 = y_c - \frac{\{f'_s(x_c)\}^2}{4b} \quad (9)$$

凝着力が接線に対して垂直にはたらくと仮定し、2つの表面間の距離を求める。図 13 において、接線上の点 $Q(x_q, y_q)$ における法線方程式がそれぞれの表面モデルと $Q_1(x_1, y_1)$ および $Q_2(x_2, y_2)$ で交わるとする。このとき、表面間の距離 dl は以下の式で表される。

$$dl = \overline{Q_1 Q_2} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (10)$$

ここで、 Q_1 の座標が既知であるとして、 Q_2 の座標を求める。 Q_1 を通り、接線に垂直な方程式は以下の式となる。

$$y = -\frac{1}{y'(x_c)}(x - x_1) + y_1 \quad (11)$$

式 (11) と式 (4) の交点が $Q_2(x_2, y_2)$ であるから、両式を連立することにより、

$$x_2 = x_0 - x_a, \quad (12)$$

$$y_2 = y_0 + bx_a^2, \quad (13)$$

Fig. 13 Distance of two polynomials

が求まる。ここで、

$$x_a \equiv \begin{cases} \frac{1}{2b} \left\{ \frac{1}{y'(x_c)} - \sqrt{\frac{1}{y'(x_c)^2} - 4b \left(\frac{x_0 - x_1}{y'(x_c)} + (y_0 - y_1) \right)} \right\} & (y'(x_c) > 0), \\ \frac{1}{2b} \left\{ \frac{1}{y'(x_c)} + \sqrt{\frac{1}{y'(x_c)^2} - 4b \left(\frac{x_0 - x_1}{y'(x_c)} + (y_0 - y_1) \right)} \right\} & (y'(x_c) < 0). \end{cases} \quad (14)$$

である。なお、上式の平方根が虚根となるときは、式 (4) と (11) が交わらず、2面間の距離が $dl = \infty$ となる。

2面間の距離 d が凝着限界距離 δd 以下のときに凝着力がはたらくと仮定する⁽¹⁶⁾。このとき、図 14 における着色部分が凝着力のはたらく範囲である。ここで、 $d = \delta d$ を満たすパーツ曲面上の点をそれぞれ $R_1(x_{r1}, y_{r1})$ および $R_2(x_{r2}, y_{r2})$ とする。パーツ座標系において、 R_1 および R_2 を通り z 軸に平行な平面の方程式は以下のように表される。

$$y_p = c_r(x_p - x_{r1}) + x_{r1}^2, \quad (15)$$

なお、

$$c_r = \frac{y_{r2} - y_{r1}}{x_{r2} - x_{r1}} \quad (16)$$

である。凝着力のはたらく面積を凝着面積と呼び、 A で定義するとすれば、凝着面積 A は、式 (3) で示される双曲面が、式 (15) で示される表面により切断された切断面の面積となる。式 (3) および (15) を連立させることにより、以下の交線方程式が求まる。

$$(x_p - \frac{c_r}{2})^2 + z_p^2 = (x_{r1} - \frac{c_r}{2})^2 \quad (17)$$

したがって、パーツ凸部 1 つあたりの凝着面積 dA は

$$dA = \pi(x_{r1} - \frac{c_r}{2})^2 \quad (18)$$

Fig. 14 Adhesion model: adhesion acts between two surfaces within a distance δd

Fig. 15 Relationship among adhesion area, contact position, and δd

となる。マイクロパーツの表面に n 個の凸部が存在すると仮定し、凝着力係数を D_A で表せば、凝着力 F_a は

$$F_a = D_A \sum_{i=1}^n dA_i \quad (19)$$

となる。ここで、 A_i は i 番目の凸部の凝着面積である。

凝着限界距離を $\delta d = 10, 5, 3, 2, 1$ nm としたときのシミュレーション結果を図 15 に示す。この図において、横軸が接触点の x 座標すなわち x_c であり、縦軸が凝着面積である。凝着面積は、 δd に比例して大きくなっている。また、 $x_c = 0.1$ から $0.15 \mu\text{m}$ の領域で、凝着面積の最小値を示している。最小値より左側の領域では、 $x_c = -0.25 \mu\text{m}$ 付近において極大値を示しているに対し、右側の領域は x_c の増加にしたがい増加している。接触座標が $x_c = \pm 0.25 \mu\text{m}$ における凝着面積比 $A(x_c = 0.25)/A(x_c = -0.25)$ は、 $\delta d = 10, 5$ および 3 nm においてそれぞれ $4.2, 2.0, 1.2$ となり、凝着力の方向性が生じている。これは、パーツがフィード表面を左から右に進むときに対して、右から左に進むときのほうが凝着力の効果が大きいことを示している。一方、 $\delta d = 2$ nm においては 0.98 であり、凝着力の方向性は得られない。また、 $\delta d = 0.1 \mu\text{m}$ においては 0.54

Fig. 16 Force balance

となり、凝着力の方向性は反転する。

4.3 凝着力の効果を含むダイナミクスの導出

図 16 において、フィード表面が振幅 A 、角振動数 ω の正弦波で振動しているとすると、マイクロパーツには $F = -mA\omega^2 \sin \omega t$ の慣性力がはたらく。ここで、 m はマイクロパーツの質量である。マイクロパーツの重力による効果が、慣性力や凝着力に比して十分小さいとすれば、 x 方向におけるマイクロパーツの運動方程式は以下のように表される。

$$m\ddot{x}_p + c\dot{x}_p = -mA\omega^2 \sin \omega t - \mu D_A A(x_c) \cos \theta \delta_s(\dot{x} - \dot{x}_p) \quad (20)$$

なお、 c は粘性減衰係数である。また、 $\delta_s(\dot{x} - \dot{x}_p)$ は以下のような符号関数である。

$$\delta_s(\dot{x} - \dot{x}_p) = \begin{cases} 1 & (\dot{x} - \dot{x}_p \geq 0) \\ -1 & (\dot{x} - \dot{x}_p < 0) \end{cases} \quad (21)$$

5. 輸送実験およびシミュレーションとの比較

フェムト秒レーザ加工表面を用いて 0402 型チップコンデンサの輸送実験を行った。実験結果を図 17 に示す。駆動周波数は $f = 120.5, 121.0, \dots, 126.5$ Hz とした。輸送には 10 個のコンデンサを用意し、それぞれの駆動周波数において 4 回の実験を行った。図では、それぞれの計測結果を $\times$ 、平均値を $\bigcirc$ で示した。なお、輸送速度計測には 30 fps のデジタルビデオカメラを使用した。フィード表面上を 30mm 移動するのに要した時間をフレーム数から計算し、そこから輸送速度を導出した。なお、実験時の温湿度はそれぞれ 25°C 、70%であった。また図 18 は、実験結果の分散

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{v} - v_i)^2 \quad (22)$$

を示す。ここで n 、 $\bar{v}$ および v_i はそれぞれデータ個数、平均速度および個々の計測値である。

駆動周波数 $f \leq 122.0$ Hz において、平均輸送速度は 3.2 から 3.3 mm/s とほぼ一定の結果となった。しかし、周波数が下がるにつれて輸送速度のばらつきが大きくなる傾向にある。また、最高平均速度は、 $f = 124.0$ Hz

において 5.1 mm/s となった。このときの1分間あたりの部品供給量は765個である。輸送速度の分散が最小となったのは $f = 125 \text{ Hz}$ のときであり、値は $s^2 = 0.50$ となった。また最高平均速度を実現した $f = 124.0 \text{ Hz}$ における分散は $s^2 = 0.78$ であり、2番目に小さい値である。駆動周波数が $f \leq 123 \text{ Hz}$ においては、駆動周波数の減少とともに分散が大きくなっている。これらの原因としては、駆動周波数が減少するにつれてパーツの駆動力が減少し、パーツの安定輸送に必要な駆動力が得られなかったことが挙げられる。また、 $f = 125.5 \text{ Hz}$ において分散が急激に大きくなり、 $f \geq 126.0 \text{ Hz}$ のとき $s^2 \approx 1.4$ となっている。これらの要因としては、パーツに伝わる駆動力が過大なためにパーツの跳躍や回転運動が生じ、輸送に費やされるべき駆動力がパーツの跳躍や回転運動に費やされるため、輸送の安定性が低下したことが考えられる⁽¹⁷⁾。すなわち、パーツに伝わる駆動力が大きいほどパーツの動きは安定し、高速に輸送される一方で、過大な駆動力によりパーツの跳躍や回転が生じた場合には、輸送速度が低下する。これは、パーツが最も高速かつ安定に輸送できる条件が存在していることを意味している。したがって、輸送の安定が高く、また高速な輸送速度を実現した $f = 124.0$ から 125.0 Hz の範囲が、最適な輸送条件が得られた駆動周波数である。

次に、式(20)を用いて輸送シミュレーションを行った(図19)。ここでは、マイクロパーツが跳躍や回転を生じず、フィード表面との接触状態を保つと仮定した。比較のために、図17で示した平均輸送速度を併記した。また、凝着限界距離を $\delta d = 10 \text{ nm}$ 、摩擦係数を $\mu = 0.3$ 、凝着力定数を $D_A = 300 \mu\text{N}/\mu\text{m}^2$ とした。これらの結果より、全体的な傾向は同一であるものの、最適な駆動周波数に誤差が生じている。また、輸送速度はシミュレーション結果に比して30%から50%誤差が生じている。これらの原因としては、シミュレーションにおいてフィード表面のばらつきやマイクロパーツの揺動や跳躍を考慮していないことが挙げられる。

6. お わ り に

本論文では、0402型セラミックコンデンサの輸送を実現するために、フェムト秒レーザ・ダブルパルス加工表面を用いた。はじめに、加工表面の非対称性を検証するために、顕微鏡を用いた実測データに基づいた表面形状モデルを導出した。次に、摩擦の非対称性を検証するために、摩擦摩耗試験システムによる摩擦係数の計測および摩擦角計測実験を行った。また、輸送対象の表面との接触解析を通して凝着力モデルを導

Fig. 17 Relationship between frequency and velocity

Fig. 18 Variance of experimental results

Fig. 19 Comparison of experiments and simulations

出ることにより、接触の方向性を検証した。最後に、0402型チップコンデンサの輸送実験を行い、フェムト秒レーザ加工表面をセラミックコンデンサの輸送に適用する場合の性能を検証した。

今後の課題としては、以下の点が上げられる。

- パーツの跳躍や回転運動が生じる駆動条件および接触条件の検証。
- パーツの跳躍および回転運動のダイナミクス導出。
- フェムト秒レーザ加工において、マイクロパーツの輸送により適した非対称表面を生成するための加工パラメータの検討
- フィード表面と輸送対象物の材質が輸送におよぼす影響の検証。

本研究は、文部科学省科学研究費補助金(若手(B), 課題番号:20760150), および財団法人メカトロニクス技術高度化財団(EMTAF)の助成を受けている。

本研究を実施するにあたり、キャノンマシナリーの二宮氏にご助力をいただきましたことに謹んで感謝の意を表します。

文 献

- (1) Mitani, A. and Hirai, S., Microparts Feeding by a Sawtooth Surface (Derivation of Feeding Dynamics of Microparts) (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.73, No.725, pp.114-121, 2007.
- (2) T. Ninomiya, H. Sawada et al.,: *Formation of Periodic Surface Structure by Double-pulsed Femtosecond Laser Irradiation* (in Japanese), *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 71, No. 7, pp. 921-925, 2005.
- (3) Tsukamoto, M. and Hashida, M., Material Processing of Metal with Femtosecond Laser (in Japanese), *Transaction of Japan Welding Society*, Vol. 72, No. 8, pp.622-625, 2005.
- (4) Sakaguchi, K. and Taniguchi, O., Research of a Vibratory Feeder(2nd Report) (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series I*, Vol.35, No.279, pp.2183-2189, 1969.
- (5) Wolfsteiner, P. and Pfeiffer, F., The Parts Transportation in a Vibratory Feeder, *Proceeding of the IUTAM Symposium on Unilateral Multibody Contacts*, pp.309-318, 1999.
- (6) Frei, P.U., An Intelligent Vibratory Conveyer for the Individual Object Transportation in Two Dimensions, *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1832-1837, 2002.
- (7) Morcos, W.A., On the Design of Oscillating Conveyors -Case of Simultaneous Normal and Longitudinal Oscillations-, *Transaction of the ASME, Journal of Engineering for Industry* Vol.92, No.1, pp.53, 1970.
- (8) Izawa, M. and Nozaki, T., Research of Vibratory Feeding by Combined Vibration Blades(1st Report)(in Japanese), *Transaction of Precision Machines*, Vol.41, No.5, pp.453, 1975.
- (9) Du, W.Y., Dikerson, S.L., Modelling and Control of A Novel Vibratory Feeder, *Proceedings of the 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.496-501, 1999.
- (10) Ando, Y. and Ino J., The Effect of Asperity Array Geometry on Friction and Pull-Off Force, *Transactions of ASME, Journal of Tribology*, Vol.119, No.4, pp.781-787, 1997.
- (11) S. Konishi and H. Fujita, "A conveyance system using air flow based on the concept of distributed micro motion systems" *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical system*, Vol. 3, No. 2, pp. 54-58, 1994.
- (12) Ataka, M, Takeshima, N., Omodaka, A., and Fujita, H., "Fabrication and Operation of polyimide bimorph actuators for a ciliary motion system", *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical System*, pp. 146-150, Vol. 2, No. 4, 1993.
- (13) K.-F. Böhringer, "Surface modification and modulation in microstructures: controlling protein adsorption, monolayer desorption and micro-self-assembly", *Journal of Micromechanics and microengineering*, Vol. 13, pp. S1-S10, 2003.
- (14) Fujisawa, S., Ando, Y., and Enomoto, Y., Friction and Inter-surface Force in Micro-scale (in Japanese), *Transaction of the Japanese society of Tribologists*, Vol.44, No.6, pp.409-413, 1999.
- (15) The Institute of Electrostatics Japan, *New Edition of Electrostatics Handbook (in Japanese)* pp.1027, Ohmsha, Ltd., 1998.
- (16) Ando, Y., Tanaka, T., Ino, J., and Kakuta, K., Relations Among Friction and Pull-Off Forces and Surface Geometry in Nano Meter-Scale(in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.65, No.637, pp.3784-3791, 1999.
- (17) Mitani, A., Yoshimura, T., and Hirai, S., Feeding of Microparts along a Saw-tooth Surface using only Horizontal and Symmetric Vibration - Analysis of Decrease of Feeding Velocity by Rotational Motion of Microparts (in Japanese), *Procs. JSME ROBOMECH 2007*, 1A2-N05, 2007