

フェムト秒レーザ加工を用いた 非対称表面によるマイクロパーツの輸送*

三谷 篤史*¹, 平井 慎一*²

Feeding of Microparts Using an Asymmetric Surface Microfabricated by Femtosecond Laser Process

Atsushi MITANI*³ and Shinichi HIRAI

*³ Sapporo City University, School of Design
1 Geijyutu-no-mori, Minami-ku, Sapporo, Hokkaido 005-0864, Japan.

We have previously shown that an asymmetric microfabricated surface, for example, saw-toothed surface, can feed along microparts using simple planar symmetric vibration. Microparts move forward because they adhere to the asymmetric surface asymmetrically. In this study, we assessed microfabricated surfaces using a femtosecond laser processing tool to feed along 0402-type capacitors (size: $0.4 \times 0.2 \times 0.2$ mm, weight: 0.1 mg). To generate three asymmetric profile surfaces, we applied the double-pulsed femtosecond laser irradiation technique and the single beam femtosecond laser diagonal irradiation technique. We evaluated the asymmetry of these microfabricated surfaces based on measurements using an atomic force microscope (AFM) system. We then derived surface profile model and its approximation model of each surface, and also analysed contact between each approximation profile model and a micropart. We conducted feeding experiments of 0402-type capacitors with the same driving condition using these microfabricated surfaces. Experimental results were compared to assess which surface was appropriate for feeding along 0402-type capacitors.

Key Words : Asymmetry, Unidirectional Feeding, Femtosecond Laser Process, Microparts Feeder

1. 緒 言

筆者らは、基盤実装用の小型抵抗・コンデンサなどのマイクロパーツを輸送する機構として、のこぎり歯など非対称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提案している⁽¹⁾。この機構は、フィーダ表面にのこぎり歯形状表面加工を施し、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⁽²⁾の適用について検討する。ここでは、フェムト秒レーザダブルパルス加工表面を用いて0402型セラミックチップコンデンサ(サイズ: $0.4 \times 0.2 \times 0.2$ mm, 重量: 0.1 mg)を輸送対象とし、マイクロパーツとフィーダ表面の形状を、顕微鏡による実測データに基づいてモデル化し、より正確な接触

モデルおよび凝着力モデルを導出する。次に、それらの表面形状モデルを用いて、マイクロパーツとフィーダの接触を解析し、凝着力モデルを導出することにより、フェムト秒ダブルパルス加工表面による一方向輸送について検討する。さらに、輸送実験を行うことにより、フェムト秒レーザ加工表面の輸送特性を明らかにする。

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⁽³⁾⁽⁴⁾や、水平方向と垂直方向それぞれに振動を与える方法⁽⁵⁾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^{(6)~(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

* 原稿受付 2008 年 XX 月 XX 日

*¹ 札幌市立大学 デザイン学部 (〒 005-0864 北海道札幌市南区芸術の森 1 丁目)

*² 立命館大学 理工学部 (〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Email: a.mitani@scu.ac.jp

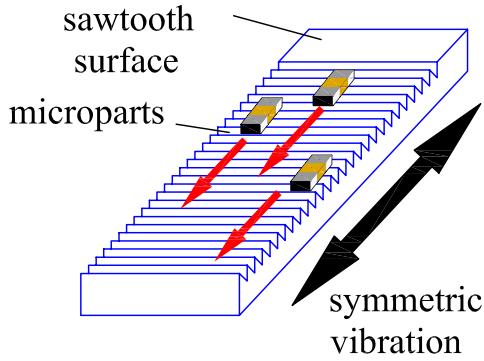


Fig. 1 Diagram of the microparts feeder using a sawtooth surface with simple planar and symmetric vibration

り、エネルギー効率の高い駆動が期待できる。

微小なパーツを効率よく輸送するために、Micro-electro mechanical system(MEMS)などの微細加工システムを用いてフィード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が研究されている⁽¹⁰⁾。しかし、これらは静的な状態での検討であり、凝着力が輸送対象物の輸送特性におよぼす影響については考察されていない。

本論文の目的は、数～数十ミクロンサイズの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誘起周期構造

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。材料に第1パルス照射して50ps後に材料の蒸散が生じ始める。それと同時に第2パルスを照射し蒸発粒子を再加熱することで、反跳力は第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非対称表面を加工した。なお、材料は厚さ0.5mm、幅10mm、長さ40mmのステンレス材である。図2に、AFMを用いて撮影した加工表面を示す。加工表面には凸部が周期的に現れているのがわかる。AFM画像を、走査型顕微鏡写真解析ソフトGwyddionを用いて解析した結果を図3に示す。これらの結果から、加工表面に現れた凸部の周期は0.92μm、溝深さは0.17μmであり、凸部高さのばらつきは0.025μmであった。

次に、凸部の非対称性について検証する。図4に、任意の凸部における表面形状を示す。ここでは、これらの凸部を以下の線形多項式で近似する。

$$y(x) = a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0, \quad (1)$$

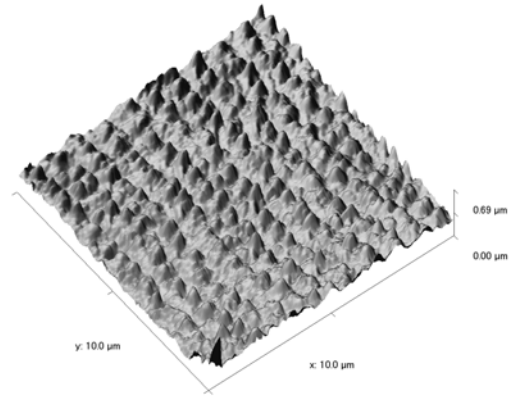


Fig. 2 Micro-fabricated surface profile, as shown by the atomic force microscope (AFM)

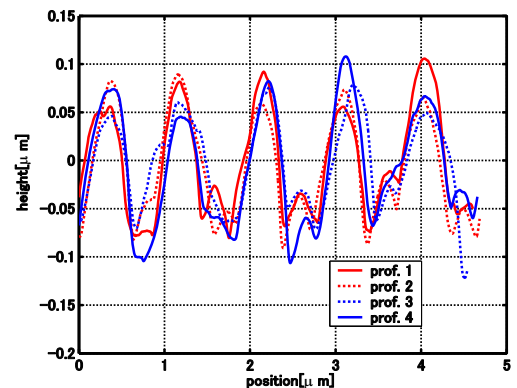


Fig. 3 Periodicity of the micro-fabricated surfaces

ここで、 x および y はそれぞれ水平方向の位置および高さである。近似曲線を図5に示す。近似曲線が $x = 0$ において極大値となるように変形し、極大値の両側における傾きを計算すると、 $x = -0.25 \mu\text{m}$ における傾きの平均は $y' = 0.43$ であるのに対し、 $x = 0.25 \mu\text{m}$ では $y' = -2$ 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%となっているのが分かる。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. マイクロパーツ表面形状モデルの導出

顕微鏡システムとしてユニバーサルズーム顕微鏡MULTIZOOM AZ100(ニコンインステック)を用いた。本顕微鏡には、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0.276μm/pixelである。0402型チップ

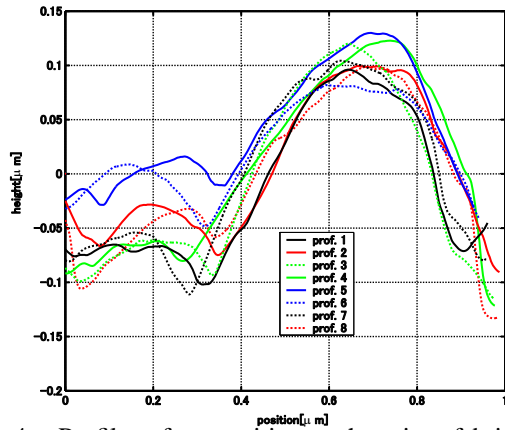


Fig. 4 Profiles of convexities on the micro-fabricated surface

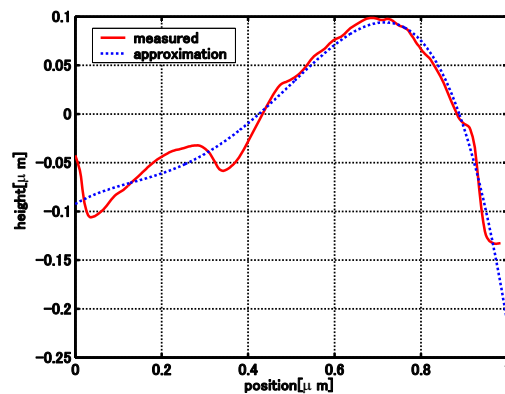


Fig. 5 Approximation function of a convexity

プロコンデンサの顕微鏡写真を図 6 に示す．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．これらの写真を Gwyddion で分析した結果を図 7 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．ここでは，マイクロパーツ表面に存在する凸部の断面形状を，2 次の線形多項式で近似する場合を考える．図 8 に，任意の凸部における表面形状モデルとその線形近似モデルを示す．このとき，近似モデルを水平軸周りに反転し， $(x, y) = (0, 0)$ において極小値となるように変形すると，線形近似モデルは以下の式で表される．

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

最終的に凸部表面モデルは，式 (2) で表されるモデルを， 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 $O_p - x_p y_p z_p$ を考える．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 $r = x_p = \sqrt{y_p}$ の円となる．す

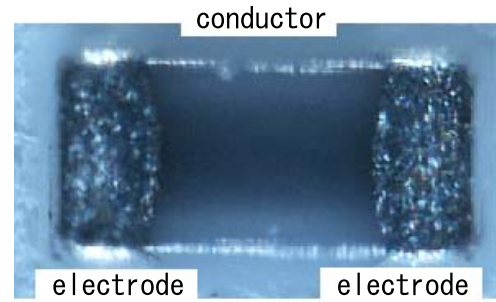


Fig. 6 Picture of a 0402-type capacitor

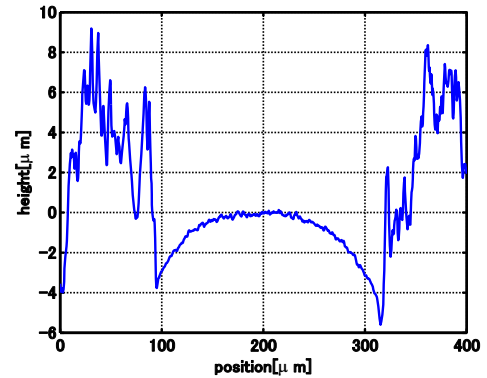


Fig. 7 Surface profile of 0402-type capacitor

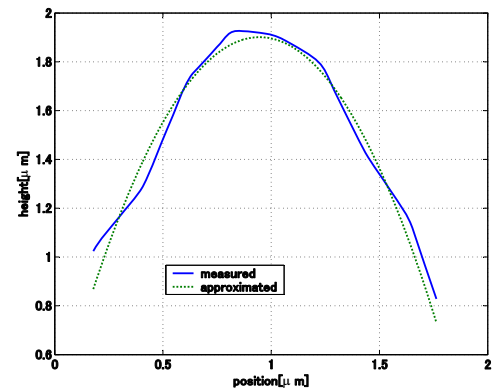


Fig. 8 Convexity on the surface of 0402-type capacitor and its approximation

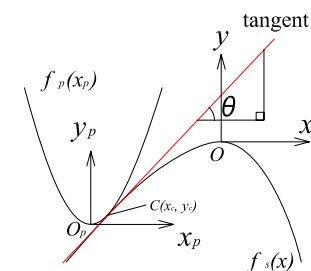


Fig. 9 Contact of surface models

なわち，凸部表面形状を表す方程式は

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

となる．

4. マイクロパーツとフィード表面の接触解析

図9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)の極小値を原点としたパーツ表面座標系 $O_p-x_p y_p z_p$ を定義した。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、

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

$$f'_s(x_c) \equiv \frac{df_s(x)}{dx} = 4a_4x^3 + 3a_3x^2 + 2a_2x + a_1 \quad (7)$$

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。

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

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

ここで、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検討する。図10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、

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

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

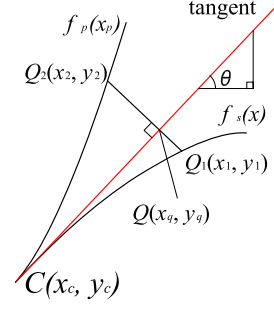


Fig. 10 Distance of two polynomials

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。このとき、図11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。

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

したがって、凝着面積 A は

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

となる。凝着力係数を D_A で表せば、凝着力 F_a は

$$F_a = D_A A \quad (19)$$

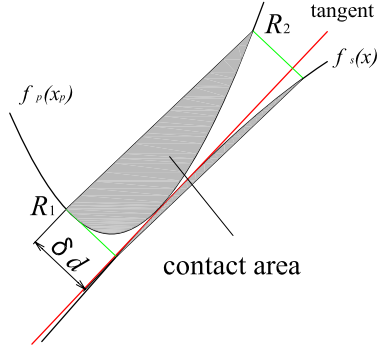


Fig. 11 Adhesion model: adhesion acts between two surfaces within a distance δd

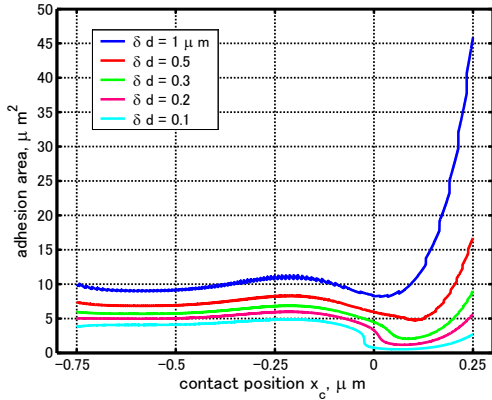


Fig. 12 Relationship among adhesion area, contact position, and δd

Table 1 Coefficients of approximation functions(μm)

b	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
1.75e-02	-2.97	-4.75	-2.24	0	0

となる。

表1のパラメータを用いて、凝着限界距離を $\delta d = 1, 0.5, 0.3, 0.2, 0.1 \mu\text{m}$ としたときのシミュレーション結果を図12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、 $x_c = 1$ から $1.5 \mu\text{m}$ 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、 $x_c = -2.5 \mu\text{m}$ 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。 $x_c = \pm 2.5 \mu\text{m}$ における凝着面積比 $A(x_c = 2.5)/A(x_c = -2.5)$ は、 $\delta d = 1.0, 0.5$ および $0.3 \mu\text{m}$ 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、 $\delta d = 0.2 \mu\text{m}$ 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 となり、凝着力の方向性は反転する。

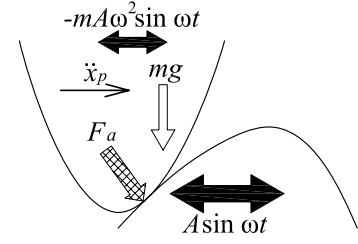


Fig. 13 Force balance

図13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べ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、 $\delta_s(\dot{x} - \dot{x}_p)$ は以下のようなデルタ関数である。

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

5. 輸送実験およびシミュレーションとの比較

フェムト秒レーザー加工表面を用いて 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14に示す。駆動周波数は $f = 120.5, 121.0, \dots, 126.5 \text{ Hz}$ 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 \circ 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15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 $f \leq 122.0 \text{ Hz}$ 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、 $f = 124.0 \text{ Hz}$ 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。 $f \leq 123$ 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考えられる。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。したがって、駆動周波数が $f = 124.0$ から 126.0 Hz の範囲で最も安定した輸送が実現できている。

次に、式 (20) を用いて輸送シミュレーションを行った (図 16)。ここでは、マイクロパーツが跳躍や回転運動せず、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 14 で示した平均輸送速度についても併記した。また、凝着限界距離を $\delta d = 0.1 \mu\text{m}$ 、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. 結 言

本論文では、非対称形状表面を用いたマイクロパーツフィードにおいて、フェムト秒レーザー加工の適用を検討した。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、輸送対象の表面との接触解析を行い、凝着力モデルを導出することにより、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、フェムト秒レーザー加工表面の輸送特性を明らかにした。今後は、フェムト秒レーザー加工表面の最適化を試みる。

謝 辞

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

文 献

- (1) A. Mitani, N. Sugano, and S. Hirai, Micro-parts Feeding by a Saw-tooth Surface, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.11, No.6 (2006), pp. 671-681.
- (2) T. Ninomiya, H. Sawada et al., Formation of Periodic Surface Structure by Double-pulsed Femtosecond Laser Irradiation(in

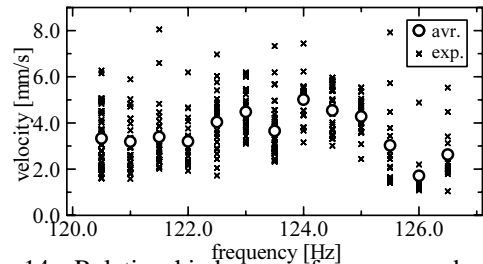


Fig. 14 Relationship between frequency and velocity

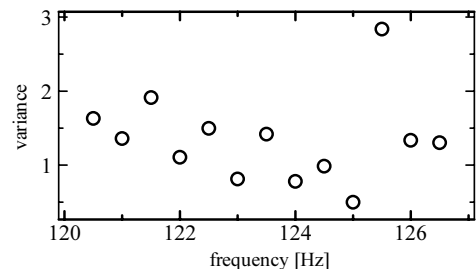


Fig. 15 Variance of experimental results

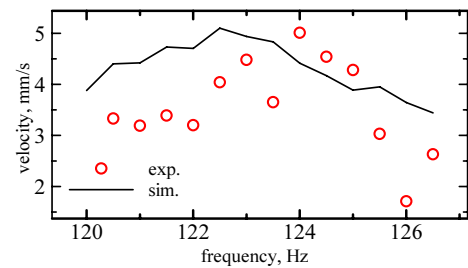


Fig. 16 Comparison of experiments and simulations

Japanese), *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 71, No. 7 (2005), pp. 921-925.

- (3) Sakaguchi, K. and Taniguchi, O., Research of a Vibratory Feeder(2nd Report)(in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series 1*, Vol.35, No.279(1969), pp.2183-2189.
- (4) Wolfsteiner, P. and Pfeiffer, F., The Parts Transportation in a Vibratory Feeder, *Proceeding of the IUTAM Symposium on Unilateral Multibody Contacts*, (1999), pp.309-318.
- (5) Frei, P.U., An Intelligent Vibratory Conveyor for the Individual Object Transportation in Two Dimensions, *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2002), pp.1832-1837.
- (6) 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(1970), pp.53.
- (7) Ishizaka, A. et al., Vibratory Feeding systems using High-order Vibrations(in Japanese), *Transaction of Precision Machines*, Vol.39, No.1(1973), pp.93.
- (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(1975), pp.453.
- (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*, (September 19-23 1999) pp.496-501.
- (10) Ando, Y. et al., 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(1999), pp.3784-3791.