

平成 22 年 6 月 4 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2008 年度 ~ 2009 年度
 課題番号：20760150
 研究課題名 (和文) フェムト秒レーザー加工表面を用いた対称振動輸送における微小物体のダイナミクスの解明
 研究課題名 (英文) Dynamics solutions of microparts feeding using femtosecond laser fabricated surfaces with symmetric vibrations
 研究代表者
 三谷篤史 (MITANI ATSUSHI)
 札幌市立大学 デザイン学部 講師
 研究者番号：70388148

研究成果の概要 (和文)：フェムト秒レーザーの斜め照射を用いて、3種類の非対称形状表面を開発した。これらの表面を用いて微小物体の輸送実験を行い、微小物体が一方向に輸送されることを確認した。各表面の非対称性を計測に基づいて検証すると共に、微小物体との接触を定式化し、凝着力を含むダイナミクスを導出した。ダイナミクスを用いて輸送シミュレーションを行い、実験結果と比較することにより、導出したダイナミクスの妥当性を検証した。

研究成果の概要 (英文)：I developed three asymmetric fabricated surfaces using the oblique femtosecond laser irradiation. Conducting feeding experiments of microparts, I verified that microparts could be fed along on each fabricated surface. Formulating contact between fabricated surfaces and a micropart based on measurement, I derived micropart dynamics including adhesion. I assessed validity of the derived dynamics by comparison of experimental results and feeding simulation of microparts using the derived dynamics.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機会力学

キーワード：フェムト秒レーザー，モデル化，トライボロジー，マイクロ・ナノデバイス，輸送機器

1. 研究開始当初の背景

振動式パーツフィーダは、生産の自動化において重要な役割を果たしている。従来用いられているボウルフイーダやリニアフィーダ

は、斜め振動や機械的な傾きを利用し、正方向と負方向で異なる慣性力を得ることで、物体の一方向輸送を実現している。一方、ミクロンオーダー以下の物体の運動においては、

慣性力に比して表面力や凝着力の影響が大きくなる。これらは、MEMS (micro electro-mechanical systems) 技術の応用による操作方法が検討されている。10~100 μm オーダーの微小物体は、それらの中間に当たる大きさであり、これらの動特性解析においては、フィーダテーブルの振動による慣性力だけでなく、表面との間に生じる摩擦力や凝着力の影響をも考慮する必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、10~100 μm オーダーの微小な物体を輸送する場合において、トライボロジ特性を考慮した微小物体の動特性を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、微小物体の振動輸送を目的としたパーツフィーダにおいて、フィーダ表面にフェムト秒レーザー加工により得られた非対称表面を適用した場合の輸送特性を検証する。ここでは、フェムト秒レーザーの斜め照射によって得られる非対称加工表面について、顕微鏡による表面形状の観察を通して非対称性を定量的に解析する。次に、様々な温湿度環境下における凝着力の影響を、摩擦角計測により明らかにする。これらの表面を用いて微小物体の輸送実験を行い、微小物体のダイナミクスを同定する。

4. 研究成果

(1) フェムト秒レーザー加工表面の詳細

フェムト秒レーザーの斜め照射により、非対称な凸形状の周期構造をステンレス材の表面に生成した。一例を図1に、示す。ここでは、レーザーの照射方法や入射角、重畳回数といった加工パラメータを調整することにより、3種類の非対称形状加工表面を得た。



図1 フェムト秒レーザー加工表面

図2は、図1に示した加工表面を原子間力顕微鏡 (AFM) で撮影した画像である。これらの画像を解析することにより、任意凸部の断面形状とその近似モデルを得る (図3)。ここでは、4次の線形多項式で近似した。これらのモデルから、加工表面に生成された周期構造の溝深さ、ピッチ、凸形状の非対称性を検証した。前項において得られた3種類の加工表面それぞれについて、同様な手法を用いて解析した結果を表1に示す。

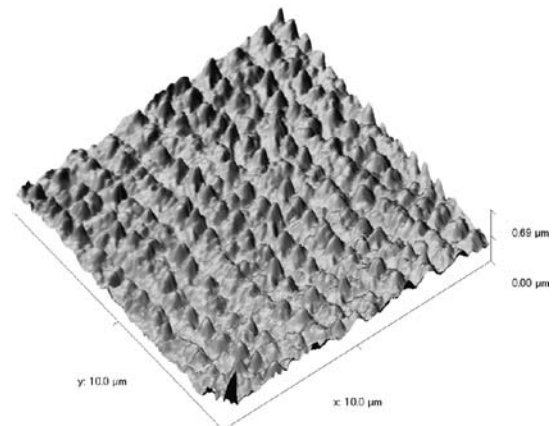


図2 AFM 撮影画像

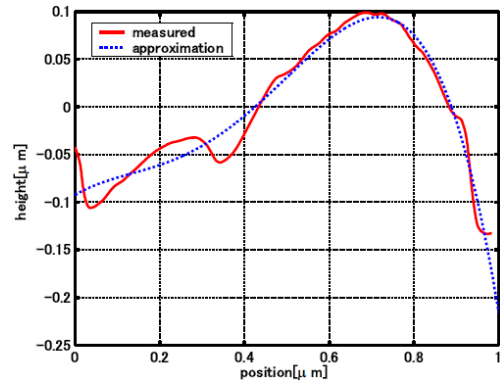


図3 凸部断面形状とその近似モデル

表1 加工表面形状のパラメータ (Duty比が50%=非対称性なし)

surface	period. · m	depth · m	incline		duty ratio, %
			left	right	
A	0.92	0.17	0.43	-1.91	18.4
B	1.34	0.35	0.46	-0.60	43.4
C	2.05	0.38	0.29	-0.69	29.6

(2) 摩擦の非対称性検証

フィーダ表面の摩擦特性に及ぼす影響を検証するために、微小物体の摩擦角計測実験を行った。ここでは、微小物体として 0402 型チップコンデンサ (0.4×0.2×0.2 mm, 0.1 mg) を適用し、加工表面を時計回り (正方向) および反時計回り (負方向) に傾斜させた場合の摩擦角をそれぞれ計測した。また、微細加工による摩擦低減効果を検証するために、未加工表面についても計測した。特に、マイクロ荷重化においては、周囲の温度や湿度が摩擦特性に影響を及ぼすことを考慮し、温湿度制御下で実験を行った。実験結果の一例を図4に示す。ここでは、以下の結果が得られた。

- ・表面の微細加工により、摩擦低減効果が得られた。
- ・湿度によらず摩擦角の非対称性が生じた。
- ・湿度の増加に応じて摩擦角が増加した。

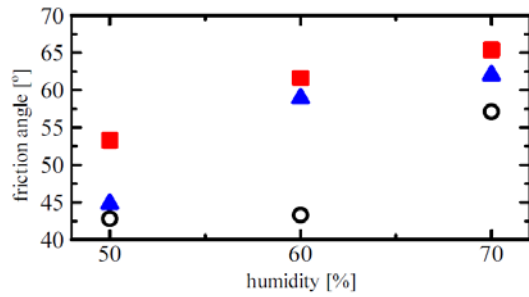


図 4 微小物体の摩擦角と湿度の関係

(3) 微小物体の輸送実験

図 5 に示す実験装置を用いて、0402 型チップコンデンサの輸送実験を行った。ここでは、振動振幅 $A=0.2\text{ mm}$ ，周波数 $f=120.5, 121.0, 121.5, \dots, 126.5\text{ Hz}$ の方形波振動を与えた。なお、室温は 25°C ，湿度は 70% とした。輸送実験は、10 個の微小物体を用いて 4 回行い、それぞれの輸送速度を計測した。実験結果を図 6 に示す。この図において、それぞれの実験結果を \times で示し、平均速度を \circ で示している。ここでは、駆動周波数 124.0 Hz において、最高平均速度 5.1 mm/s を実現した。

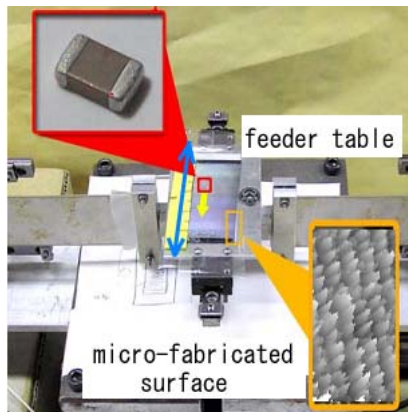


図 5 実験装置

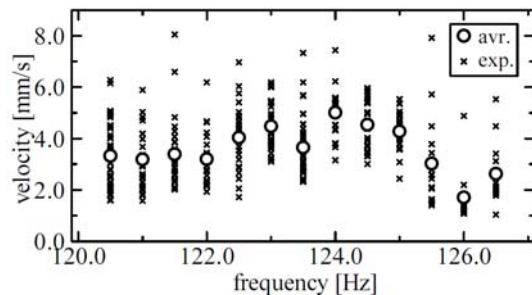


図 6 輸送実験結果

(4) 凝着力を含むダイナミクスの同定

加工表面と微小物体の輪郭を、顕微鏡を用いた計測に基づいて定式化し、それらの接触を解析した。微小物体として適用した 0402 型チップコンデンサの写真とその解析結果を図 7 および 8 にそれぞれ示す。微小物体は、導電体とその両端の電極から構成されてい

る。電極は導電体から約 $8\ \mu\text{m}$ 突出しており、この電極にある微小な凸部とフィーダ表面が接触する。図 9 に、微小な凸部の輪郭とその 2 次関数による近似モデルを示す。これらの近似モデルと、図 3 で示した加工表面の近似モデルとの接触を解析した(図 10)。

凝着力は、実際に接触している部分だけでなく、2 面間距離が一定の距離以下となる範囲においてもはたらく。ここでは、モデル間の距離 d が凝着限界距離 δd 以下の部分に凝着力がはたらくと仮定し、凝着力を導出した(図 11)。

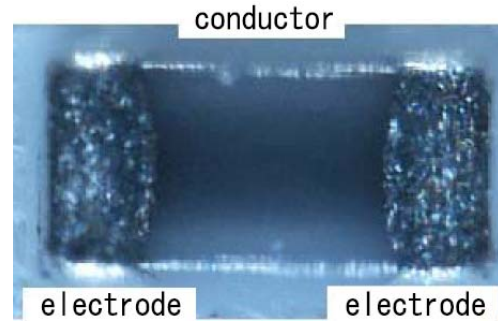


図 7 0402 型チップコンデンサ

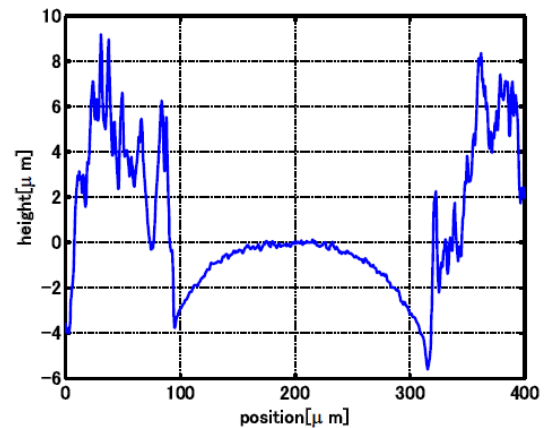


図 8 解析結果

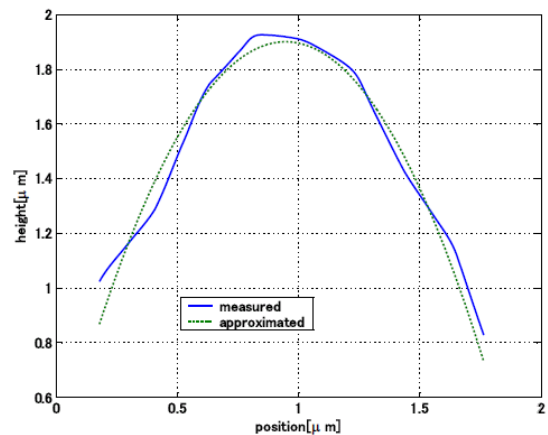


図 9 凸部形状とその近似モデル

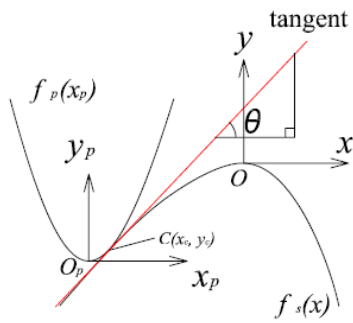


図 10 近似モデル同士の接触解析 (f_p が微小物体, f_s が加工表面の近似モデルである. 両モデルとも線形多項式であるため, 接触点において接線を共有する)

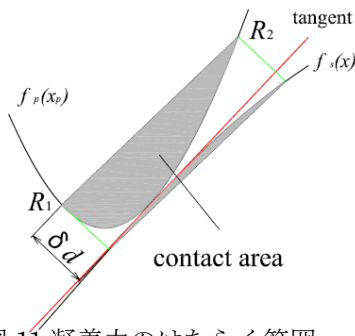


図 11 凝着力のはたらく範囲

これらの凝着力モデルの解析に基づき, 凝着力を含むダイナミクスを導出した. 図 12 に示すように, ある接触状態における力のつり合いを考える. この図において, A は振動振幅, ω は角周波数, m は微小物体の質量, F_a は凝着力, g は重力加速度であるとする. また, 右方向に x 軸の正方向を取り, 微小物体の位置を x_p で表すとする. 重力による効果が慣性力や凝着力に対して十分小さいとすれば, 以下の式が成り立つ.

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

ここで, μ は摩擦係数, c は粘性減衰係数である. また, δ_s は以下のような符号関数である.

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

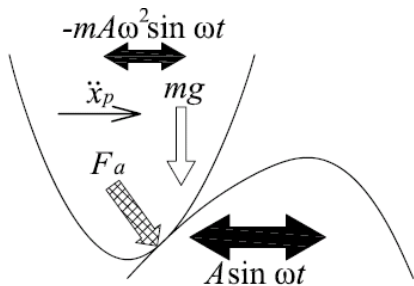


図 12 力のつり合い

(5) シミュレーションと実験結果の比較によるダイナミクスの検証

前項で導出し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(図 13). 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ダ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.

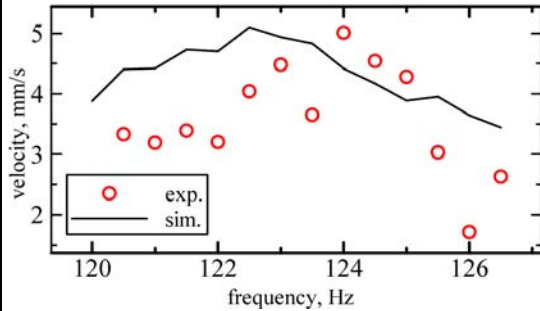


図 13 ダイナミクスを用いた輸送シミュレーション

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

(1) 三谷篤史, 平井慎一, フェムト秒レーザー・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, 日本機械学会論文集(C編), 査読有, Vol. 75, No. 760, 2009, 3267-3275.

(2) 三谷篤史, 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(計測データに基づく接触モデルの定式化と凝着力の解析), 日本機械学会論文集(C編), 査読有, Vol. 75, No. 752, 2009, 942-949.

(3) Atsushi Mitani, Shinichi Hirai, Submillimeter Micropart Feeding Along an Asymmetric Femtosecond-Laser-Microfabricated Surface, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol. 3, No. 2, 2009, 151-156.

[学会発表] (計 11 件)

(1) 三谷篤史, 平井慎一, のこぎり歯形状を有する表面によるサブミリサイズマイクロパーツの水平対称振動輸送 ~ 輸送方向の周波数依存性に関する検証 ~, 精密工学会 2009 年度秋季大会, 2009 年 9 月 10 日, 神戸大学

(2) Atsushi Mitani, Shinichi Hirai, Evaluation of Tribology Characteristics of Asymmetric Surfaces Fabricated by Femtosecond Laser Process for Microparts feeding, World Tribology Congress 2009, 2009年9月9日, 京都国際会館

(3) 三谷篤史, 平井慎一, 非対称な形状を有する表面によるサブミリサイズマイクロパーツの水平対称振動輸送-フェムト秒レーザ加工表面を用いた輸送におけるダイナミクスの解析-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009 (ROBOMECH2009), 2009年5月26日, 福岡国際会議場

(4) Atsushi Mitani, Shinichi Hirai, Evaluation of Asymmetric Microfabricated Surfaces Using Femtosecond Laser Process for Microparts Feeding, International Conference on Mechatronics 2009, 2009年4月16日, Malaga, Spain

(5) 三谷篤史, 平井慎一, 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, 第14回ロボティクス・シンポジウム, 2009年3月17日, 北海道登別市

(6) 三谷篤史, 平井慎一, 非対称形状表面によるマイクロパーツの対称振動輸送(第7報:フェムト秒レーザ加工表面の最適化に関する検証), 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2008), 2008年12月5日, 岐阜市 長良川国際展示場.

(7) Atsushi Mitani, Shinichi Hirai, Application of Asymmetric Surface Fabricated by Femtosecond Laser Process for Microparts Feeding, SPIE International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT2008), 2008年11月18日, San Diego, CA, USA.

(8) Shinichi Hirai, Atsushi Mitani, Feeding of Submillimeter-sized Microparts along an Asymmetric Surface Using Only Horizontal Vibration: Evaluation of Micro-Fabricated Surface Using Femtosecond Laser Process, IEEE/RSJ 2008 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2008), Sep. 25, 2008, Nice, France

(9) Toshiatsu Yoshimura, Atsushi Mitani, Shinichi Hirai, Feeding of Submillimeter Microparts Along an Asymmetric Fabricated

Surface by Double-Pulsed Femtosecond Laser Process, Third Asia International Symposium on Mechatronics (AISM2008), Aug. 29, 2008, Hokkaido University.

(10) Atsushi Mitani, Shinichi Hirai, Feeding of Submillimeter-sized Microparts along an Asymmetric Surface Using Only Horizontal Vibration (Analysis of Contact between Feeder Surface and Microparts Based on Measurements), IEEE Conference on Automation Science and Engineering 2008 (CASE 2008), Aug. 26, 2008, Washington D.C., USA.

(11) 三谷篤史, 平井慎一, 非対称な形状を有する表面によるサブミリサイズマイクロパーツの水平対称振動輸送, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008, 2008年6月7日, 長野市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三谷 篤史 (MITANI ATSUSHI)

札幌市立大学・デザイン学部・講師

研究者番号: 70388148