ベッセルビームの光放射圧ポテンシャルを用いた
マイクロスケール Additive Manufacturing の加工原理検証道畑 正岐^{*1}, 林 政洋^{*2}, 代慶 真^{*2}, 高増 潔^{*2}, 高橋 哲^{*3}

Fundamental study on micro-scaled additive manufacturing using optical potential induced by optical radiation pressure by Bessel beam

Masaki MICHIHATA^{*1}, Masahiro HAYASHI^{*2}, Makoto YOKEI^{*2}, Kiyoshi TAKAMASU^{*2}
and Satoru TAKAHASHI^{*3}^{*1,*2}Department of Precision Engineering, the University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan^{*3}Research Center for Advanced Science and Technology, the University of Tokyo
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8904, Japan

Received: 13 June 2019; Accepted: 9 September 2019

Abstract

Manufacturing technology for three-dimensional nano/micro-structures has been desired. In this study, we newly proposed the laser additive manufacturing method in vapor phase, by utilizing optical trapping potential to confine particles in a range smaller than diffraction limit of laser beam. In this paper, we have developed the optical trapping system with Bessel beam in order to investigate feasibility of the proposed fabrication methods. The water droplet of several μm in diameter containing particles suspended in space were successfully trapped in the optical potential of Bessel beam and then the only particles were deposited on the substrate. As a result of processing experiment, the silica particles with a diameter of 1 μm could be three dimensionally structured on the axis of the Bessel beam.

Keywords : Laser fabrication, Nano-manufacturing, Additive manufacturing, Optical potential, Optical radiation pressure, Optical tweezers, Bessel beam

1. 緒 言

近年、高付加価値製品の製造技術が求められている。高付加価値化の代表例として、微細構造による機能性表面 (Koch and Barthlott, 2009; Bruzzone et al., 2008) があり、この微細構造を創成するため、例えば機械加工 (Xu et al., 2014) やリソグラフィ (Min et al., 2008; Hulteen et al., 1999)、電解加工 (Kawanaka et al., 2014)、レーザ加工 (Ganeev et al., 2010) などが提案されている。これらの加工技術は優れた手法であり高い期待を集める一方で、加工可能形状の自由度が低い、2 次元的な加工であり高さ方向の形状制御が困難であるなどの課題点が指摘されている。今後、さらなる高付加価値化に向け、3 次元的な微細形状を広域かつ形状自由度を高く加工可能な技術が求められる。そこでレーザを用いた付加製造技術 (Additive manufacturing) の研究が盛んに行われている。レーザを用いると、ビーム集光によって局所的にエネルギーを作用させ、微細性かつ高い形状制御性を実現可能である。加えて、マルチスポット化が容易かつビーム走査も高速に行えるため (Kato et al., 2005)、面露光には劣るものの、高速なステップ&リピートによる広域な加工への展開も実現性がある。

これまでに、集光ビームを用いた種々の付加加工技術が開発されてきた。その多くは、集光ビームのスポット近傍での高いエネルギー密度を媒質に吸収させ、その吸収エネルギーによる化学的変化を励起するものである。

No.19-00244 [DOI:10.1299/transjsme.19-00244], J-STAGE Advance Publication date : 17 September, 2019

本論文は、第12回生産加工・工作機械部門講演会 講演論文集(2018)、No.C08の掲載内容に基づいた論文である。

^{*1} 正員, 東京大学 精密工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)^{*2} 東京大学 精密工学専攻^{*3} 正員, 東京大学 先端科学技術研究センター (〒153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1)

E-mail of corresponding author: michihata@nanolab.t.u-tokyo.ac.jp

例えば、光硬化性樹脂を用いた光造形 (Kobayashi and Ikuta, 2008), 光触媒励起による金属イオン析出 (Yoshigoe et al., 2014; 堀田他, 2015), レーザ援用 Chemical vapor deposition (CVD) (Duty et al., 2001), Laser induced forward transfer (LIFT) (Zenou et al., 2015), Focused ion beam (FIB) -CVD (Matsui et al., 2000) など多くの手法が提案されている。また、2光子吸収を用いたナノ光造形 (Maruo et al., 1997) や金属イオン直接還元 (Tanaka, 2006) など、集光ビームのさらに2光子吸収過程を利用することで、加工範囲を制限できナノスケールの加工分解能を実現している。また、集光スポットへの強いエネルギー勾配を利用したナノ粒子集積加工 (Matsuura et al., 2017) などとも提案されている。これら技術を表1にまとめる。表に示すように、これまでに提案された技術は、溶媒中や樹脂内での加工が多い。産業的な応用を想定した場合、空気環境で行えることが望ましい。溶液中加工は、微細部品を溶液から取り出す際に、表面張力により構造が破損するため、凍結乾燥法や超臨界流体装置など特殊装置が必要となり、コスト増や歩留り低下の要因となる。また、真空環境は製造のスループットが低下する。さらに、多様な材料 (ポリマー, セラミック, 金属, バイオ材料など) に対応可能な加工技術がより望まれる。

そこで、本研究では、光放射圧ポテンシャルによる微粒子の局在化と集積を利用して空気中で3次元的に微細構造を付加加工する手法を提案する。本論文では特に、加工原理の実験的な検証を目的とする。

Table 1: Various method of focused beam fabrication for micro-scale structure.

Method	Energy source	Environment
Laser CVD	Laser	Vacuum
Laser induced forward transfer	Laser	Air
Photocatalyst assisted metal ion reduction	Laser	Solution
Two photon polymerization	Laser	Resin
Single photon polymerization	Laser	Resin
Metal ion reduction with two photon absorption	Laser	Solution
Focused ion beam-CVD	Ion beam	Vacuum
Laser trapping assisted nanoparticle deposition	Laser	Solution

2. 加工原理

2・1 光放射圧ポテンシャルに基づく付加加工コンセプト

本研究で提案する手法について述べる。提案手法の基礎原理は、光放射圧による粒子の集積である。ナノ/マイクロ粒子に作用する光放射圧は、光のポインティングベクトルに沿った散乱力と、電場の勾配によって作用する勾配力の2つの力に大別できる。今、高いNAの対物レンズによって収束したビームの焦点面内に粒子が侵入した場合を考えると、光軸に垂直な方向では、勾配力によって粒子はビームスポット中心に引き寄せられる力を受ける (Ashkin, 1992)。つまり、光放射圧ポテンシャルの安定な中心に捕捉される。外乱や揺らぎのない理想条件において、粒子は常にビームの中心で安定するため、高精度に粒子を位置決めできる。現実には、ビームの揺らぎやブラウン運動などの要因でビームスポット中心からやや幅を持つ範囲に局在する。このように粒子をビームスポットに局在させ、それを積み上げることで3次元の構造を創成する。

従来提案された多くの例は、加工雰囲気充滿するイオンや原子/分子にエネルギーを与え、析出や相変化させるため、被加工材料をビームスポット近傍に運搬する工程は必要ない。しかし提案手法では、空気環境下で加工を行うため、被加工材料を集光ビーム近傍に導入する必要がある。そこで図1に示すように、被加工材となる粒子を水などの溶媒に混ぜ、ミスト化する。その粒子を含んだミストを集光ビームによってビームスポットに局在させる。液滴サイズは10 μm 程度であるため、媒質は気化し、含有していた粒子のみが集積され、ビームウエストを走査することで3次元構造を加工できる。加工の分解能を上げるためには、サブマイクロからナノスケールで行える。ミストを用いる理由は、微小な粒子は光との相互作用が弱く、集光ビームのごく近傍に接近しなければ光放射圧が効果的に作用しない。しかし、よりサイズの大きい液滴が粒子を含むことで、光のエネルギーを享受しやすく、つまり粒子のキャリアとしての機能を果たすため、広範囲に分布する粒子を集めることができる。本加工手法は、粒子/液滴に対する光圧力作用を利用するため熱影響がほとんど存在せず、熱影響による

加工範囲の拡大が起きない。また、従来の光強度をベースとした加工法では加工閾値の調整によって加工分解能が大きく影響するが、本手法では粒子の局在範囲は光放射圧ポテンシャルで決定されるため、加工閾値の精密調整は不要である。加工の分解能に関しては用いる粒子サイズが本質的であり、例えば、ナノ粒子を用いて、外乱や揺らぎを低減することで、原理的にはナノスケールの加工分解能が期待できる。最後に、原理的に材料に対する制限はほぼ存在せず、金属から生体材料まで幅広い材料に対して適用可能である。

2・2 ベッセルビームを用いた加工原理検証

本論文では、提案手法の原理検証を目的としている。つまり、粒子を含む液滴を空間に散布し、液滴がキャリアとして粒子を光放射圧ポテンシャルに導入し、最終的にビームスポットで粒子のみが構造化するという原理の基礎検証を行う。本研究の将来的な目標では、集光ビーム走査による3次元の構造創成であるが(図1)、本報では原理検証を容易にするためベッセルビーム(Preston et al., 2014)を用いた(図2)。ベッセルビームは光軸垂直面内の強度分布がほぼ等しいまま伝搬するビームであり、光軸中心の0次光のビーム幅は集光ビームに近い数 μm を持ちながら、集光ビームの焦点深度の数 μm より遥かに長い数100 μm の伝搬距離を持たせることができる。0次光の光放射圧ポテンシャルを利用することで液滴はビームの中心に捕捉され、散乱力の駆動により光軸に沿って移動する。つまり、ビーム走査なしに垂直3次元構造が創成できる(図2)。そのため、側方観察により液滴の挙動観察も容易であり、本提案技術の原理検証に適している。本論文では、このベッセルビームを用いた加工原理の検証を目的とした。

3. 実験装置

本研究で構築した加工システムについて述べる。光源には波長1064 nmのファイバーレーザー(連続発振、直線偏光)を用いた。光源から出た光はコリメータによって約4.3 mm径の平行光となる。1/2波長板で偏光方向を調整したのち、アキシコンレンズ(頂角178°)によってベッセルビームを構築する。そのベッセルビームはレンズ1および対物レンズ(N.A.0.65, W.D. 4.5 mm)によって縮小され、結果として0次光ビーム径3.2 μm 、伝搬長さ280 μm のベッセルビームが構築されるよう設計されている。本研究では、液滴捕捉の容易さのため倒立型のOptical levitationシステムとした。加工の様子は、上方および側方に設置された顕微鏡システムによって観察する。また、対物レンズを囲うようにガラスでチャンバーを設置し、その内部にミストを分散させる。構造物の基板(カバーガラス)はチャンバー内に固定され、チャンバーは3軸ステージによってその位置を調整可能である。ミスト生成には、市販の卓上加湿器を使用した。加湿器からチャンバーまでストローでミストを導く。カバーガラスに付

Fig. 1 Concept of the proposed fabrication technique.

Fig. 2 Fabrication using a Bessel beam.

Fig. 3 Illustration of experimental setup.

Fig. 4 Photograph of experimental setup.

Fig. 5 Constructed Bessel beam.

着した液滴サイズを観察した結果、ミスト直径は数 μm から 10 μm であったが、その粒度分布の測定は行っていない。また、本研究では、キャリアとなる液滴として水を、加工材としてシリカ微粒子（直径 1 μm ）を用いた。直径 1 μm のシリカ微粒子を用いた理由は、本論文の目的が液滴をキャリアとした粒子のビームスポットへの集積という原理検証であるため、観察が容易かつ分散性の良さを考慮し選択した。構築した実験装置の概要を図 3 に、その写真を図 4 に示す。図 5 は構築した実験装置により生成された対物レンズ焦点位置でのベッセルビームの強度分布を示す。ベッセルビームの 0 次ビーム径が 2.9 μm であり、設計値と約 10% の差はあったが等方的で良好なビームが形成できていることが確認できたため、これを用いて以降の実験を行った。

4. 提案加工原理の検証

4・1 液滴をキャリアとした粒子集積原理の確認

生成したミストの光放射圧による駆動を確認した。レーザパワーは対物レンズに入射前で約 765 mW とし、レーザによって駆動される液滴を横観察系によって確認した。図 6 にその結果を示す。CMOS カメラの露光時間は 20 ms、フレームレートは 50 fps と設定している。レーザは画面の下方から上方に向かって伝搬しており、液滴で散乱した波長 1064 nm の散乱光を観察している。図 6(a) はミストを供給している最中の図である。点線矢印は粒子の移動方向を示す。ミスト供給中は、画面内に無数の液滴が浮遊していることが確認できた。ミスト供給による空気の流れによって、高速に移動しているが、その運動軌道がベッセルビームによって曲げられる様子が観察できる。次に、ミストの供給を停止し、停止後 1.95 秒および 1.98 秒の撮影像が同図(b), (c) である。ミスト供給を停止すると、それまで高速に移動していたミストが空間を緩やかに漂うようになり、画面内で観察できる液滴の頻度は低下するが、その移動速度も遅くなっている。そのため、図 6(b) に示すように、ベッセルビームの 0 次光に沿って液滴が軌道を変化し（同図(b)）、その後光軸に沿って駆動されている（同図(c)）様子が確認できた。カメラのフレームレートから換算した結果では、駆動されるミストの速度は約 2 mm/sec であった。このように液滴がベッセルビームの光放射圧ポテンシャルによってビームの伝搬垂直方向では光軸中心に閉じ込められ、同時に散乱力による光軸方向への駆動が確認できた。

次にベッセルビームによる粒子堆積を確認するため、カバーガラス基板を y 軸方向に変位させながら観察した。ベッセルビームによる液滴駆動を横観察システムで確認した後、上方の顕微鏡システムを用いて粒子堆積を観察すると、液滴が粒子を含んでいる場合は、基板到達時に粒子が現れるが、粒子を含んでいない場合、上方観察では変化は観察できない。粒子の基板上への堆積を確認できれば、手動ステージを y 軸方向に数 μm 移動させ、粒子の堆積位置を相対的に変化させた。また、レーザパワーを対物レンズ直前で約 7 W とし、供給するストローの位置を調整することで、ミスト供給しながらベッセルビームで粒子捕捉できたため、ミストをチャンバー内に供給しながら加工を行った。その際の結果を図 7 に示す。白の点線はスポット位置の軌跡を示す。図のように、ベッセルビームの 0 次光スポットから数 μm ズレているものの、基板への粒子堆積が確認できた。参考にレーザーを照射せず、ミスト供給のみでカバーガラスに付着する液滴を観察した場合、図 8 のように見える。図 7 と 8 の

(a) In supplying the mist. (b) 1.95 second after supplying mist. (c) 1.98 second after supplying mist.

Fig. 6 Lateral view of trapping the droplet using Bessel beam. Micro-particles are delivered with water droplets. The droplet with the particle is confined into the optical potential of the Bessel beam and driven to the substrate

様相が明らかに異なることから、粒子を含んだミストがベッセルビームによって基板上に集積されていることが確認できた。一方で、液滴が粒子を含む割合が半分弱であり、今後は、液滴が粒子を含む割合を向上させる必要があることもわかった。

最後に、ステージを変位させず基板上の同一箇所粒子を堆積させ、粒子集積による3次元付加加工特性を確認した。ミストをチャンバー内に供給しながら加工を行い、数10分間粒子の集積を観察した。その結果、数10個のシリカ微粒子が基板上に堆積している様子が確認できた(図9(a))。本研究で提案する、液滴をキャリアとした粒子運搬と、光放射圧ポテンシャル誘導による粒子集積という加工原理の実現可能性を実験的に検証できた。一方で、加工結果にはキャリアである液滴は確認できなかった。液滴がどの段階で気化したかという詳細については、今回の実験では確認することができていない。今後、高速度カメラ導入などにより液滴気化の状態について観察し、本加工原理のより深い検討を行う。集積した構造物を走査型電子顕微鏡で観察した様子を図9(b)に示す。このように粒子を集積させることで3次元構造を創成可能であることが示唆された。一方で、ベッセルビームの0次ビーム径が約 $3\mu\text{m}$ であるにも関わらず、粒子群は幅 $6\mu\text{m}$ ×奥行 $5\mu\text{m}$ の範囲に集積する結果となり、また高さ方向にも粒子3層程度のみが積み上がる結果となった。図7と図9の結果について、実験時の観察などを基に考察すると、ミスト供給を工夫により空気の流れを緩やかにしたが、依然として液滴の移動速度は速く、その結果、ベッセルビーム0次の光放射圧ポテンシャル内に留めることができず、ややずれた位置に付着したと考えられる(図10(a))。よって、ベッセルビームの光軸に対して縦に積み上がるのではなく、基板面内方向に広がるように粒子が凝集してしまう。そこで、ミストの移動速度を低下させることで、液滴および粒子の局在特性を向上させ、加工精度を高めることが期待できる(図10(b))。以上を踏まえ、次に、ミストの供給を停止した状態で実験を行い、つまり空気の流れをより落とした状態で加工を行い、その形成される粒子群の形態を観察する。

Fig. 7 Deposition of the particles in a low.

Fig. 8 Adhered droplet on substrate.

(a) Optical microscope image.

(b) SEM image.

Fig. 9 Fabricated structure by the proposed method. Micro-particles were stacked 3-dimensionally, but the accuracy of fabrication was not high.

Fig. 10 Considered fabrication error caused by speed of droplet drift.

Fig. 11 Deposition of the particles in a low with lowered velocity of droplet.

Fig. 12 Fabricated microstructure by the proposed method with lowered velocity of droplet. Vertically the microparticles were structured along with the optical axis of the Bessel beam.

4・2 提案手法を用いた3次元構造創成の検証

ミストの供給を停止させた状態で、再度同様の加工を行った。まず、図7と同様にステージをy軸にそって変位させ、粒子の付着位置を相対変化させながら加工を行った。レーザーパワーは約6Wとした。その他の加工条

件, および手順は前回と同様である. 加工結果を図 11 に示す. 図 7 では, スポットの軌道から数 μm 外れて粒子が堆積されていたが, 図 11 では, スポット位置の軌跡に沿って精度よく加工できていることが確認できた.

次に, ステージを変位させない粒子堆積の加工を行った. レーザーパワーは約 6 W である. その他の加工条件については前回と同様である. その結果を図 12 に示す. 基板のほぼ水平方向から走査型電子顕微鏡で観察した結果である. 図に示すように粒子が高さ方向に 10 数個積み上がっていることが確認でき, 液滴速度を低下させることで高い精度で粒子を集積することが可能であった. 繰り返し実験を実施した結果, 図 12 同様の構造が得られた. 以上より, 本研究で提案する光放射圧ポテンシャルによってマイクロスケールの 3 次元付加加工が実現可能であることが確認できた. 構造が傾斜しているのは, 加工後に傾いたかあるいは光軸が基板に対して元々傾いていた可能性がある. また, 部分的に凝集が見られる箇所については液滴に複数粒子が含まれていた可能性が考えられるが, 今後詳細な検討は必要である.

5. 結 言

本研究では, 光放射圧ポテンシャルによる微粒子の局在化と集積を利用して空気中環境で 3 次元的に微細構造を付加加工するという新たな加工技術を提案した. 本論文では特に, 加工材料となる微小粒子を光放射圧ポテンシャルに導入するための手法として, 液滴をキャリアとして用いる手法を提案した. 水に微粒子を混ぜミストとして散布する. そのミストをレーザで捕捉し構造化するという手法を実験的に検証した. 以下に, 本論文で得られた結論をまとめる.

- (1) ベッセルビームの光放射圧ポテンシャルを用いて, 空間に浮遊する微粒子を含んだ直径数 μm の水滴を駆動し基板上に微粒子のみを集積するという, 本提案手法の基礎原理を実験的に検証することができた.
- (2) 加工精度の向上のため, ミストの運動が緩やかになる条件で加工を行なった結果, ベッセルビームの光軸上に直径 1 μm のシリカ微粒子を局在化させることができ, シリカ粒子を 10 数個積み上げることができた. これによって, ミストをキャリアとして粒子を散布し, それを光放射圧ポテンシャルによって集積・構造化する加工手法を実験的に実証できた.

今後は, ナノ粒子の集積加工および集光ビームを用いた 3 次元のより自由度の高い形状創成技術の実現を目指す.

謝 辞

本研究は日本学術振興会科研費 (No.17H04900) および国際科学技術財団の研究助成を受けたことを記し, 御礼申しあげます.

文 献

- Ashkin, A., Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime, *Biophysical Journal*, Vol. 61, Issue 2 (1992), pp. 569–582.
- Bruzzone, A.A.G., Costa, H.L., Lonardo, P.M. and Lucca, D.A., Advances in engineered surfaces for functional performance, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 57, Issue 2 (2008), pp. 750–769.
- Duty, C., Jean, D. and Lackey, W.J., Laser chemical vapour deposition: materials, modelling, and process control, *International Materials Reviews*, Vol. 46, Issue 6 (2001), pp.271–287.
- Ganeev, R.A., Baba, M., Ozaki, T. and Kuroda, H., Long- and short-period nanostructure formation on semiconductor surfaces at different ambient conditions, *Journal of the Optical Society of America B*, Vol. 27, Issue 5 (2010), pp. 1077–1082.
- 堀田陽亮, 吉越久倫, 松田恵介, 道畑正岐, 高増 潔, 高橋 哲, レーザー集光点近傍における光触媒反応を利用した三次元微細構造創製に関する研究, *日本機械学会論文集*, Vol. 81, No. 832 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00309.
- Hulteen, J.C., Treichel, D.A., Smith, M.T., Duval, M.L., Jensen, T.R. and Van Duyne, R.P., Nanosphere lithography: Size-tunable silver nanoparticle and surface cluster arrays, *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 103, No. 19 (1999), pp. 3854–3863.

- Kato, J., Takeyasu, N., Adachi, Y., Sun, H.-B. and Kawata, S., Multiple-spot parallel processing for laser micromanufacturing, *Applied Physics Letters*, Vol. 86, Issue 4 (2005), 044102.
- Kawanaka, T., Kato, S., Kunieda, M., Murray, J.W. and Clare, A.T., Selective surface texturing using electrolyte jet machining, *Procedia CIRP*, Vol. 13 (2014), pp. 345–349.
- Kobayashi, K. and Ikuta, K., Three-dimensional magnetic microstructures fabricated by microstereolithography, *Applied Physics Letters*, Vol. 92, Issue 26 (2008), 262505.
- Koch, K. and Barthlott, W., Superhydrophobic and superhydrophilic plant surfaces: an inspiration for biomimetic materials, *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, Vol. 367, Issue 1893 (2009), pp. 1487–1509.
- Maruo, S., Nakamura, O. and Kawata, S., Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization, *Optical Letters*, Vol. 22, Issue 2 (1997), pp. 132–134.
- Matsui, S., Kaito, T., Fujita, J., Komuro, M., Kanda, K. and Haruyama, Y., Three-dimensional nanostructure fabrication by focused-ion-beam chemical vapor deposition, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, Vol. 18, Issue 6 (2000), pp. 3181–3184.
- Matsuura, T., Takai, T. and Iwata, F., Local electrophoresis deposition assisted by laser trapping coupled with a spatial light modulator for three-dimensional microfabrication, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 56, No. 10 (2017), 105502.
- Min, W.-L., Jiang, B. and Jiang, P., Bioinspired self-cleaning antireflection coatings, *Advanced Materials*, Vol. 20, Issue 20 (2008), pp. 3914–3918.
- Preston, T.C., Mason, B.J., Reid, J.P., Luckhaus, D. and Signorell, R., Size-dependent position of a single aerosol droplet in a Bessel beam trap, *Journal of Optics*, Vol. 16, No. 2 (2014), 025702.
- Tanaka, T., Two-photon-induced reduction of metal ions for fabricating three-dimensional electrically conductive metallic microstructure, *Applied Physics Letters*, Vol. 88, Issue 8 (2006), 081107.
- Xu, S., Shimada, K., Mizutani, M. and Kuriyagawa, T., Fabrication of hybrid micro/nano-textured surfaces using rotary ultrasonic machining with one-point diamond tool, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 86 (2004), pp. 12–17.
- Yoshigoe, H., Kadoya, S., Takahashi, S. and Takamasu, K., Fabrication and composition control of three-dimensional dielectric metal microstructure using photocatalyst nanoparticles, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 8, No. 4 (2014), pp. 523–529.
- Zenou, M., Sa'ar, A. and Kotler, Z., Laser jetting of femto-liter metal droplets for high resolution 3D printed structures, *Scientific Reports*, Vol. 5 (2015), 17265.

References

- Ashkin, A., Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime, *Biophysical Journal*, Vol. 61, Issue 2 (1992), pp. 569–582.
- Bruzzone, A.A.G., Costa, H.L., Lonardo, P.M. and Lucca, D.A., Advances in engineered surfaces for functional performance, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 57, Issue 2 (2008), pp. 750–769.
- Duty, C., Jean, D. and Lackey, W.J., Laser chemical vapour deposition: materials, modelling, and process control, *International Materials Reviews*, Vol. 46, Issue 6 (2001), pp.271–287.
- Ganeev, R.A., Baba, M., Ozaki, T. and Kuroda, H., Long- and short-period nanostructure formation on semiconductor surfaces at different ambient conditions, *Journal of the Optical Society of America B*, Vol. 27, Issue 5 (2010), pp. 1077–1082.
- Horita, Y., Yoshigoe, H., Matsuda, K., Michihata, M., Takamasu, K. and Takahashi, S., Research on three-dimensional microfabrication using photocatalytic reaction at the vicinity of beam waist, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol. 81, No. 832 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00309.
- Hulteen, J.C., Treichel, D.A., Smith, M.T., Duval, M.L., Jensen, T.R. and Van Duyne, R.P., Nanosphere lithography: Size-tunable silver nanoparticle and surface cluster arrays, *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 103, No. 19 (1999), pp. 3854–3863.
- Kato, J., Takeyasu, N., Adachi, Y., Sun, H.-B. and Kawata, S., Multiple-spot parallel processing for laser micromanufacturing, *Applied Physics Letters*, Vol. 86, Issue 4 (2005), 044102.

- Kawanaka, T., Kato, S., Kunieda, M., Murray, J.W. and Clare, A.T., Selective surface texturing using electrolyte jet machining, *Procedia CIRP*, Vol. 13 (2014), pp. 345–349.
- Kobayashi, K. and Ikuta, K., Three-dimensional magnetic microstructures fabricated by microstereolithography, *Applied Physics Letters*, Vol. 92, Issue 26 (2008), 262505.
- Koch, K. and Barthlott, W., Superhydrophobic and superhydrophilic plant surfaces: an inspiration for biomimetic materials, *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, Vol. 367, Issue 1893 (2009), pp. 1487–1509.
- Maruo, S., Nakamura, O. and Kawata, S., Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization, *Optical Letters*, Vol. 22, Issue 2 (1997), pp. 132–134.
- Matsui, S., Kaito, T., Fujita, J., Komuro, M., Kanda, K. and Haruyama, Y., Three-dimensional nanostructure fabrication by focused-ion-beam chemical vapor deposition, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, Vol. 18, Issue 6 (2000), pp. 3181–3184.
- Matsuura, T., Takai, T. and Iwata, F., Local electrophoresis deposition assisted by laser trapping coupled with a spatial light modulator for three-dimensional microfabrication, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 56, No. 10 (2017), 105502.
- Min, W.-L., Jiang, B. and Jiang, P., Bioinspired self-cleaning antireflection coatings, *Advanced Materials*, Vol. 20, Issue 20 (2008), pp. 3914–3918.
- Preston, T.C., Mason, B.J., Reid, J.P., Luckhaus, D. and Signorell, R., Size-dependent position of a single aerosol droplet in a Bessel beam trap, *Journal of Optics*, Vol. 16, No. 2 (2014), 025702.
- Tanaka, T., Two-photon-induced reduction of metal ions for fabricating three-dimensional electrically conductive metallic microstructure, *Applied Physics Letters*, Vol. 88, Issue 8 (2006), 081107.
- Xu, S., Shimada, K., Mizutani, M. and Kuriyagawa, T., Fabrication of hybrid micro/nano-textured surfaces using rotary ultrasonic machining with one-point diamond tool, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 86 (2004), pp. 12–17.
- Yoshigoe, H., Kadoya, S., Takahashi, S. and Takamasu, K., Fabrication and composition control of three-dimensional dielectric metal microstructure using photocatalyst nanoparticles, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 8, No. 4 (2014), pp. 523–529.
- Zenou, M., Sa'ar, A. and Kotler, Z., Laser jetting of femto-liter metal droplets for high resolution 3D printed structures, *Scientific Reports*, Vol. 5 (2015), 17265.