



M. Mizutani

レーザー照射と超精密切削の サイマルプロセッシングによる 高品位微細構造体の創成

水谷 正義*

キーワード：レーザープロセッシング，超精密切削，デバリリング，微細構造体，機能性表面

1. 緒言

製品の設計において材料の選択や形状は重要であるが、それと同等に表面機能が製品の性能に寄与する割合も大きい。最近では表面加工技術の進歩が著しく、それらによって表面を高機能化し、製品としての性能・機能を向上させることを目的とした研究が盛んに行われている¹⁾。

とくに光学製品や光学素子の開発では、表面に微細な構造体を創成することにより、光学機能を向上させる、あるいは別の特殊な機能を発現させることが可能になる。例えばサブミクロンオーダーの微細構造体を表面に創成した場合には、その構造体の存在によって、強い光学異方性や波長依存性、あるいは共鳴現象による電磁場の増強や狭い領域への光閉じ込め等、様々な光学現象が発現する²⁾。そのため、それらの現象を理解し、それらを効率的かつ効果的に発現させる構造体を創成することが重要になる。

微細構造体による高機能化を応用した光学素子に関して、一部ではすでに実用化が進められている。その中で、超精密切削によって微細構造体を創成する方法は、形状自由度や材料選択性などの様々な利点から適用範囲は広範である³⁾⁴⁾。ただしその一方で、この方法で微細構造体を創成した場合には、欠けやバリといった欠陥の発生が大きな課題となる。とくに今後さらに構造体の微小化、高精度化が期待される中で、この欠陥をいかに除去するかは大きなポイントになる。

本研究は、著者らが提案するレーザー援用サイマルプロセッシング (LAS) を適用し、この課題の解決を狙ったものである。ここで LAS とは、局所加熱切削の一種であるレーザー援用切削を、レーザーパラメータおよび切削条件を制御することにより微細構造体創成時の欠陥抑制に適用させたものである。著者らはこれまでに、通常の超精密切削と比較して LAS により微細構造体上に生成する欠陥のうち、欠けを抑制可能であることを明らかにし、本手法の有効性を示している⁵⁾⁶⁾。ただし現段階では、(I)バリ及び欠けのそれぞれの生成メカニズムの違いから、欠けの抑制は可能となっているが、バリに対してはそれを抑制する適切な条件の選定には至っていない。また、(II)レーザー照射を行うことでもたらされる悪影響についても検討の余地が残されている。そこで本研究では、(I)、(II)のそ

れぞれの現象を解明するとともに、それらを解決可能な加工プロセスの提案を目的とした。

2. 超精密切削による微細構造体創成

2.1 実験条件

本章ではまず基礎実験として、図1に示す形状を有する矩形バイトを用いて超精密切削を行い、微細構造体創成時に発生する欠陥（主にバリ）の発生状況を確認した。

実験装置にはナガセインテグレックス社製の超精密微細形状加工機 MIC-300 を使用した。本加工機は X, Y, Z 軸の最小位置決め分解能が 0.1 nm, B, C 軸分解能が 0.00001° の性能を有しており、同時 5 軸制御加工を行うことが可能である。この仕様により、本加工機は本研究で対象とするサブマイクロ～マイクロメートルオーダーの微細構造体創成に十分な性能を有している。また、被削材には P 濃度 10 wt% の Ni-P めっきを使用した。表 1 に切削実験における基本的な条件、表 2 に同実験の切込み条件を示す。

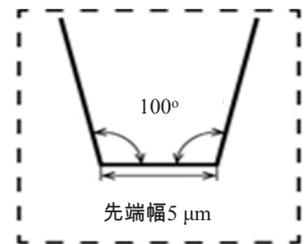


図1 矩形バイト

2.2 矩形平行溝構造体における欠陥発生状況

図 2 に矩形平行溝構造体に発生した欠陥の観察結果を示す。同図より、総切込み深さ $d = 5 \mu\text{m}$ の構造体では主に欠けが発生し、バリに関しては稜線部に微小なバリが確認される程度である。それに対して、 $d = 10, 15, 20 \mu\text{m}$ の矩形平行溝ではいずれも構造体上面の稜線部に明確なバリが発生していることが確認できる。

表 1 実験条件

| | |
|--------|----------------|
| 切削速度 | 2000 mm/min |
| 雰囲気 | 23°C |
| 切削環境 | オイルミスト |
| 被削材 | Ni-P (P10 wt%) |
| 工具材料 | 単結晶ダイヤモンド |
| 工具すくい角 | 0° |

* 東北大学 大学院工学研究科 機械機能創成専攻 准教授

表 2 切込み深さ条件

| 総切込み深さ d μm | $d_1 + d_2 + d_3 + d_4$ μm |
|--------------------------|---------------------------------------|
| $d = 5$ | 5.0 |
| $d = 10$ | 5.0 + 5.0 |
| $d = 15$ | 5.0 + 5.0 + 5.0 |
| $d = 20$ | 5.0 + 5.0 + 5.0 + 5.0 |

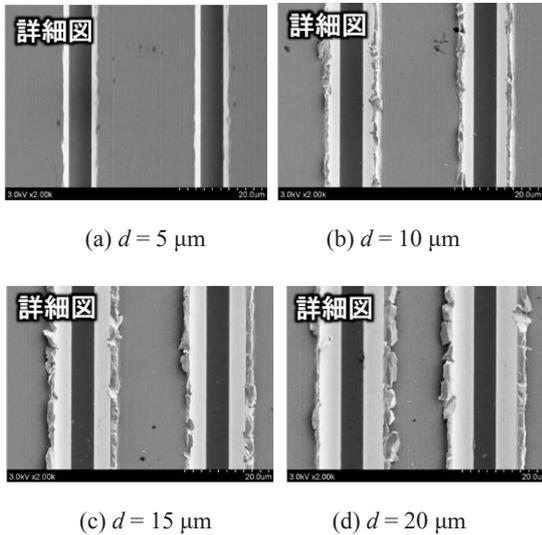
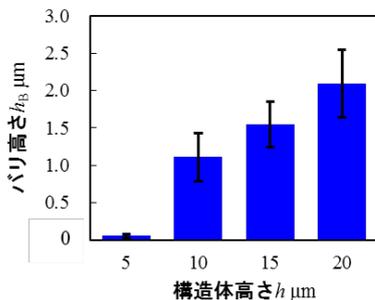
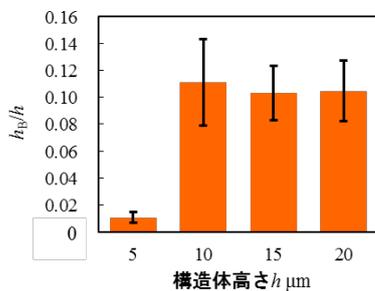


図 2 矩形平行溝構造体に発生した欠陥の様子



(a) 構造体のバリ高さの平均値 h_B



(b) h_B と構造体高さ h の比 h_B/h

図 3 微細構造体に発生したバリの評価

次に、図 2 に示したそれぞれの構造体のバリ高さの平均値 h_B についてレーザ顕微鏡を用いて測定した結果を図 3 (a) に示し、 h_B と構造体高さ h の比を算出した結果を同

図 (b) に示す。これらの図より、各構造体上に発生するバリ高さは、総切込み深さが大きくなる、すなわち高アスペクト比の構造体ほど大きくなることがわかる。とくに複数回切削により創成される $d = 10 \mu\text{m}$ 以上の構造体では構造体高さに対して一定のアスペクト ($h_B/h = 0.1$ 程度) のバリが発生することが確認できる。

3. レーザ援用サイマルプロセッシング (LAS) のデバリング効果

3・1 熱伝導解析による構造体への熱侵入長の検討

本研究では LAS 時の局所加熱を利用して微細構造体の欠陥 (バリ) を除去 (デバリング) し、高品位微細構造体を創成することを狙っている。これを実現するために鍵になるのは、構造体自体への熱の流入 (本研究では熱侵入長と表現する) を抑え、バリに対してのみ瞬間的に高エネルギーを与えることである。そこで、熱伝導解析を行うことによりデバリング時の熱侵入長 (深さ方向の温度勾配) について検討を行った。具体的にはまず、熱侵入長に対するレーザ波長 λ およびパルス幅 τ の影響について、平板に対するレーザ照射を模擬した熱伝導解析により評価を行った。

解析モデルの模式図を図 4 に示す。同図に示すように本解析では 2 次元平板モデルを用い、表 3 に示す条件でのレーザ照射を模擬した解析を行うことで λ および τ の影響を評価した。レーザ照射対象は膜厚 $100 \mu\text{m}$ の Ni-P (P10 wt%) めっきを施した基板とした。表 4 に Ni-P の熱的・機械的物性値を示す。

各条件でのレーザ照射による表面からの温度勾配を比較するため、表面での温度上昇量を 1 とした時の深さ方向の温度上昇量をまとめた結果を図 5 に示す。また、熱侵入長を表面での温度上昇量の $1/e$ となる距離と定義し、各条件によるレーザ照射での熱侵入長を表 5 に示す。図 5 に示すように、各条件でのレーザ照射による熱伝導現象を比較した場合、波長およびパルス幅が短い条件ほど表面近傍での温度勾配が大きくなることが確認できる。また、表 5 に示すように、パルス幅 3 ns のレーザによる熱侵入長は 70~80 nm であるのに対して、パルス幅 20 ps のレーザによる熱の侵入長は 22 nm と極めて小さくなることが確認できる。このことより、LAS 時のデバリングにおいても、熱侵入長の違いにより材料表面近傍での加工現象および欠陥除去性に大きな影響を及ぼすことが予想される。そこで次節では、第 2 章で最も顕著にバリが発生した $d = 15 \mu\text{m}$ の矩形平行溝構造体に対してレーザ照射を行い、レーザによるバリ除去性 (デバリング) に対する λ および τ の影響について検討する。

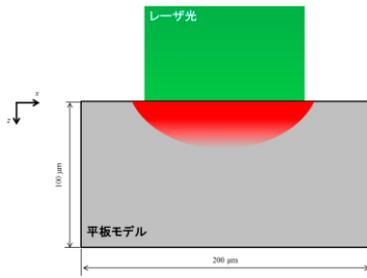


図4 熱伝導解析モデルの模式図

表3 解析条件

| | |
|--------------|-----------------------|
| 波長 λ | 355, 532, 1064 nm |
| パルス幅 τ | 3 ns, 0.5 ns, 20 ps |
| エネルギー密度 Q | 0.1 J/cm ² |
| 照射回数 N | 1 shot |
| 初期温度 T_0 | 20°C |

表4 Ni-P (P10 wt%) の熱的・機械的物性値 (室温)

| | |
|-----------------------------|-------|
| 熱伝導率 k W/(m · K) | 5.02 |
| 密度 ρ g/cm ³ | 7.9 |
| 比熱 C_p J/(g · K) | 0.480 |

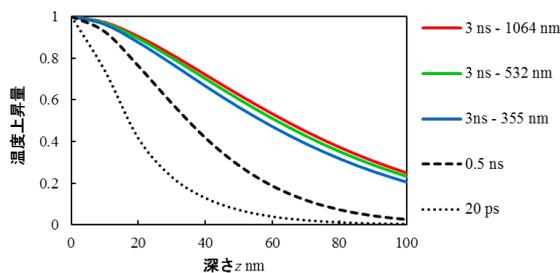


図5 各条件でのレーザー照射による深さ方向の温度勾配

表5 各条件でのレーザー照射による熱の侵入長

| パルス幅 τ | 波長 λ | 熱侵入長 l |
|-------------|--------------|----------|
| 3 ns | 1064 nm | 80.3 nm |
| | 532 nm | 77.8 nm |
| | 355 nm | 72.8 nm |
| 0.5 ns | 532 nm | 43.6 nm |
| 20 ps | 532 nm | 22.0 nm |

3・2 LASにおけるデバリング効果の実験的検証

3・2・1 デバリングに及ぼす波長の影響

LAS 時のデバリングにおける波長 λ の影響を検討するため、パルス幅を $\tau = 3$ ns と固定した条件でデバリング実験を行い、バリの除去性および構造体の形状変化について評価した。レーザー発振器には New Wave Research 社製の QuikLaze-50 を用いた。本装置のレーザー強度は、最大レーザー強度を 100% として 1 ~ 100% の間で 1% 刻みで調整可能となっている。照射範囲は長方形であり、1 辺を 1 ~ 60 μ m

の間で任意に変更可能である。なお、照射範囲の調整は光軸の絞りにより行うため、照射範囲を変化させてもエネルギー密度は一定となる。

実験条件を表 6 に示す。本実験では、デバリングにおける波長 λ の影響を検討するため、Nd: YAG レーザの基本波 ($\lambda = 1064$ nm)、第 2 高調波 ($\lambda = 532$ nm) および第 3 高調波 ($\lambda = 355$ nm) を使用して実験を行った。照射範囲は 60 μ m \times 60 μ m とし、レーザーの照射回数は 1 ~ 200 shots までの範囲で実験を行った。

図 6 にレーザー未照射面および各波長のレーザーによる $Q = 0.5$ J/cm², $N = 200$ shots の条件でのレーザー照射面 (デバリング面) の SEM 像を示す。同図より、レーザー未照射面では第 2 章での結果と同様、矩形形状平行溝構造体の稜線部にバリが発生していることが確認できる。これに対してデバリング面では、構造体稜線部のバリがレーザー照射による熱エネルギーの集中で溶融していることが確認できる。ただし、 $Q = 0.5$ J/cm² の条件では、 $\lambda = 355, 532, 1064$ nm のいずれの波長によるデバリングでもバリは完全に溶融せず、構造体稜線部に残存していることがわかる。

次に、 $Q = 1.0$ J/cm² の条件によるデバリング面を図 7 に示す。同図より、エネルギー密度が十分である場合には、各波長のレーザーによる $N = 200$ shots の条件では矩形形状溝の底部が溶融し、構造体自体の形状が劣化することがわかる。また $N = 5$ shots の条件では、 $\lambda = 355, 532$ nm の場合には、レーザー照射領域内でバリが完全に除去できていることが確認できる。一方、 $\lambda = 1064$ nm のレーザーにおいては、 $N = 5, 200$ shots のいずれの条件においても、バリ部を完全に除去できていないと同時に、矩形形状溝の底部が溶融していることが確認できる。このように、レーザーの波長によりバリの除去性に差異が生じたのは、前節で明らかにしたように各波長のレーザーを照射した際の熱の侵入長が異なることにより、構造体の表面近傍における溶融・蒸発などの熱伝導現象に差異が生じたためであると考えられる。

表6 実験条件

| | |
|--------------|-------------------------------------|
| 波長 λ | 355, 532, 1064 nm |
| エネルギー密度 Q | 0.5, 1.0 J/cm ² |
| 照射回数 N | 1 ~ 200 shots |
| パルス幅 τ | 3 ns |
| 周波数 f | 50 Hz |
| 照射面積 S | 60 \times 60 μ m ² |

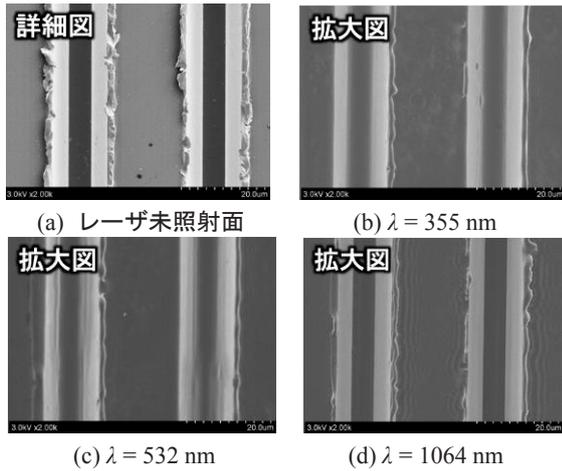
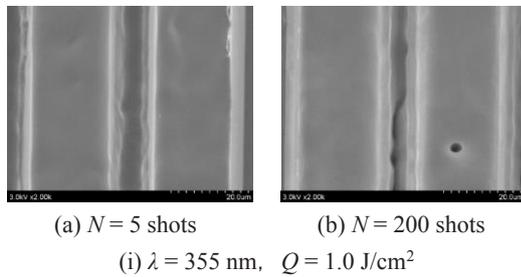
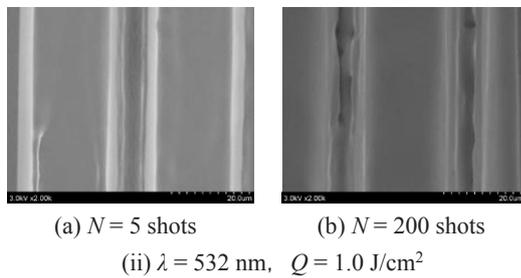


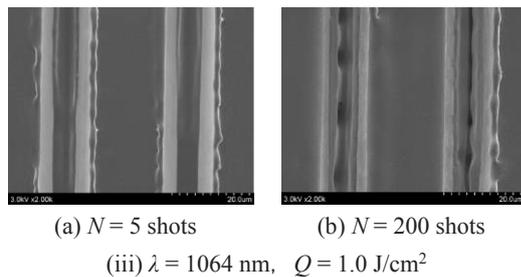
図6 レーザ未照射面およびレーザ照射面の様子
(0.5 J/cm^2 , 200 shots)



(a) $N = 5$ shots (i) $\lambda = 355 \text{ nm}$, $Q = 1.0 \text{ J/cm}^2$
(b) $N = 200$ shots



(a) $N = 5$ shots (ii) $\lambda = 532 \text{ nm}$, $Q = 1.0 \text{ J/cm}^2$
(b) $N = 200$ shots



(a) $N = 5$ shots (iii) $\lambda = 1064 \text{ nm}$, $Q = 1.0 \text{ J/cm}^2$
(b) $N = 200$ shots

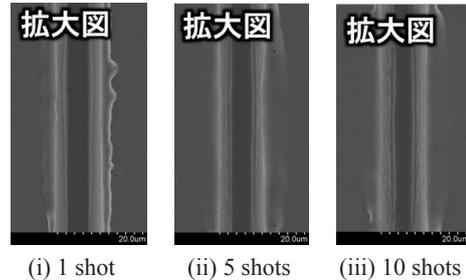
図7 レーザ照射面の様子 (1.0 J/cm^2)

3・2・2 デバリングに及ぼすパルス幅の影響

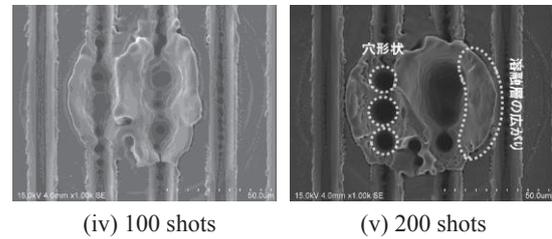
レーザデバリングにおけるパルス幅の影響を検討するために、 $\tau = 20 \text{ ps}$ のレーザによるレーザデバリング実験を行った。また、前節で最も好適な条件であった $\tau = 3 \text{ ns}$, $\lambda = 355 \text{ nm}$ のレーザによる実験結果と比較を行い、バリ除去性に対するパルス幅の影響を検討した。レーザ発振器はEKSPVA社製のPL2250を用いた。本レーザ発振器のレー

表7 実験条件

| | |
|--------------|---------------------------------|
| 波長 λ | 266 nm |
| エネルギー密度 Q | $0.01 \sim 0.06 \text{ J/cm}^2$ |
| 照射回数 N | 1 ~ 200 shots |
| パルス幅 τ | 20 ps |
| 周波数 f | 50 Hz |
| スポット径 d | 2.5 mm |



(i) 1 shot (ii) 5 shots (iii) 10 shots



(iv) 100 shots (v) 200 shots

図8 レーザ照射面の様子

($\tau = 20 \text{ ps}$, $\lambda = 266 \text{ nm}$, $Q = 0.06 \text{ J/cm}^2$)

ザ媒体は前節で用いたレーザ発振器と同じく Nd:YAG であり、基本波 ($\lambda = 1064 \text{ nm}$), 第2高調波 ($\lambda = 532 \text{ nm}$), 第3高調波 ($\lambda = 355 \text{ nm}$) に加えて第4高調波 ($\lambda = 266 \text{ nm}$) の発振が可能である。

本節の実験条件を表7に示す。本節では上述のレーザ照射装置による $\tau = 20 \text{ ps}$ のレーザにより照射実験を行い、前節での実験結果と比較を行う。波長 λ は前節での結果を踏まえ、最も好適な条件であると予想される Nd:YAG レーザの第4高調波 ($\lambda = 266 \text{ nm}$) とした。また、前節での実験と同様に照射回数は1~200 shots とした。

図8に実験結果の代表として $Q = 0.06 \text{ J/cm}^2$ の条件による

レーザ照射面の SEM 像を示す。同図 (i) に示すように、 $N = 1$ shot のレーザ照射面においてバリ部のみが溶融していることが確認できる。また、 $N = 5, 10$ shots の条件においては、同図 (ii), (iii) に示すように、レーザ照射面の中央部においてバリが完全に除去されていること



図9 フェムト秒ファイバレーザによるLASの可能性検証

が確認できる。ここで、同図 (ii), (iii) とパルス幅 $\tau = 3 \text{ ns}$ のレーザーによる実験結果 (図 7 (i) (a)) を比較すると、図 8 (ii), (iii) では構造体上面の溶融がなく、溝底部の溶融も非常に少ないことがわかる。これは、前節で述べたように熱侵入長が短いことにより、バリ部のみを優先的に溶融・除去がされたためだと考えられる。ただし照射回数が $N = 100, 200 \text{ shots}$ の場合には、同図 (iv), (v) に示すように、構造体ごと大きく破壊されることになる。とくに、同図 (v) に示す、溝底部に形成された連なった穴形状や溶融層の広がりなどは、レーザー照射の熱エネルギーによる溶融・蒸発などの熱伝導現象だけでは説明することができず、レーザーが微細構造体に入射した際に形成する電界場の影響や、非熱的な除去現象 (アブレーション) などが関わると考えられる。

以上の結果を踏まえ、現在はパルス幅 τ をフェムト秒まで短くした超短パルスのファイバレーザーを導入し、図 9 に示す通りレーザー照射口を縦型に配置することで超精密加工機上での LAS の実用可能性について検証を行っている。

4. 結言

本研究では、超精密切削によるマイクロオーダーの微細構造体上に発生したバリを除去する手法としてレーザー援用サイマルプロセッシング (LAS) によるデバリング法を提案し、その有効性について検討を行った。その結果得られた知見を以下に示す。

- (1) 先端幅 $5 \mu\text{m}$ の矩形バイトにより平行溝構造体創成実験を行った結果、構造が高アスペクト比であるほどバリの発生が顕著になることを明らかにした。
- (2) 平板に対する熱伝導解析を行い、レーザー波長の影響を検討した結果、波長が短いレーザーほど熱侵入長が小さくなることを明らかにした。
- (3) 熱伝導解析において、レーザーのパルス幅の影響を検討した結果、パルス幅が短いレーザーであるほど熱侵入長が小さくなることを明らかにした。

- (4) 第 2 章で作製した微細構造体のうち、バリの発生が顕著であった $d = 15 \mu\text{m}$ の矩形形状平行溝に対してレーザーデバリング実験を行った結果、 $\tau = 20 \text{ ps}$ 、 $\lambda = 266 \text{ nm}$ のレーザーにおいて形状誤差の増大を伴わない高品位なバリ除去が可能であることを明らかにした。
- (5) LAS におけるバリ除去性には、レーザー照射による熱の侵入長が関わることを確認し、短波長、短パルスのレーザーであるほど良好なバリ除去が可能であることを明らかにした。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団 平成 28 年度一般研究開発助成 (AF-2016221) および工作機械技術振興財団 研究助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、各財団に感謝致します。

参考文献

- 1) 太田稔: 表面機能向上のための表面改質・仕上げ技術の展望, 精密工学会誌, 81-12 (2015), 1049.
- 2) 菊田久雄: 表面微細構造による光学機能の発現と応用技術, 精密工学会誌, 74-8 (2008), 781.
- 3) 蛭原建三・山本明・河合知彦・羽村 雅之: 超精密多軸加工機によるマイクロ・ナノ切削加工, 日本機械学会誌, 111-1073 (2008), 4.
- 4) 洪榮杓: 超精密加工機の現状と加工事例, 精密工学会誌, 78-9 (2012), 744.
- 5) 益子直人・小林龍一・寺岡祥平・高柳俊・嶋田慶太・水谷正義, 厨川常元: 微細構造金型加工に対するレーザー援用マイクロ切削法に関する研究, 砥粒加工学会誌, 59-10, (2015), 588.
- 6) Xu S., Osawa S., Kobayashi R., Shimada K., Mizutani M. and Kuriyagawa T. : Minimizing berrrs and defects on microstructures with laser assisted micromachining Technology, International Journal of Automation Technology, 10-6, (2016), 891.