

平成 30 年度卒業論文

フィードバック旋盤加工による加工深さ制御

福岡工業大学工学部

知能機械工学科

15E1024 木戸 慧 15E2068 矢野 悠也

指導員 河村 良行 教授

目次

第 1 章	緒言	3
第 2 章	実験装置	5
2.1	実験装置の概要	
2.2	三軸加工駆動装置	
2.3	インターフェース	
2.4	レーザー変位計	
2.5	紫外パルスレーザー	
2.6	LabVIEW(プログラム画像等)	
2.7	イオンスパッタ	
2.8	走査型電子顕微鏡 SEM	
2.9	3次元光学プロファイラー	
第 3 章	立体加工	12
3.1	球体加工	
3.1.1	円形のプログラミング	
3.1.2	円柱加工	
3.1.3	球体加工	
第 4 章	フィードバック加工実験	16
4.1	焦点付近でのビーム径測定	
4.1.1	実験材料	
4.1.2	実験方法	
4.1.3	実験結果	
4.2	レーザー変位計の計測実験	
4.2.1	集光距離測定	
4.2.2	レーザーの最小集光型測定	
4.3	変位計の出力電圧校正	
4.4	5点での連続フィードバック制御	
4.4.1	実験方法	
4.4.2	実験結果	
4.4.3	3次元光学プロファイラーでの解析	
4.5	平面でのフィードバック実験	

第 5 章	結言	28
参考文献		
謝辞		
付録		

第 1 章

諸言

レーザー光は、レンズを用いることで光を効率的に焦点に集光させることができる。この特徴から微小な面積に高密度のパワーを得られ、材料に微小な加工ができる。それを用いて従来の刃物や切削器具を用いても不可能な機械加工を行うことをレーザー旋盤である。

本研究ではレーザー旋盤加工を行うために、三軸加工台に回転軸を取り付け、立体加工を可能にし、フィードバックを行うために、レーザー変位計を設置しそこから出力される電圧をインターフェースにつなぎ測定しフィードバック加工を行った。

第 2 章

実験装置

2.1 実験装置の概要

図 2・1 に集光実験，レーザー変位計を用いたフィードバックレーザー旋盤加工に用いた装置の概要を示す．使用するレーザーは，波長が 1064nm の Nd:YAG レーザーを，KDP 結晶を用いて高調波を発生させ，波長を 4 倍波の 266nm に変換した紫外レーザーである．ミラーで反射させ紫外光より長い波長の光を減らしながら，最終的に試料へと導かれる．レーザー光は，焦点距離 50mm の合成石英レンズを用いて集光させた．

また，加工した試料がどの程度レーザーによって加工できているかを図るためにビーム径 $40\mu\text{m}$ ，最高集光距離 113mm のレーザー変位計を用いた．

この変位計もインターフェースに接続し LabVIEW で測定を行えるようにした．

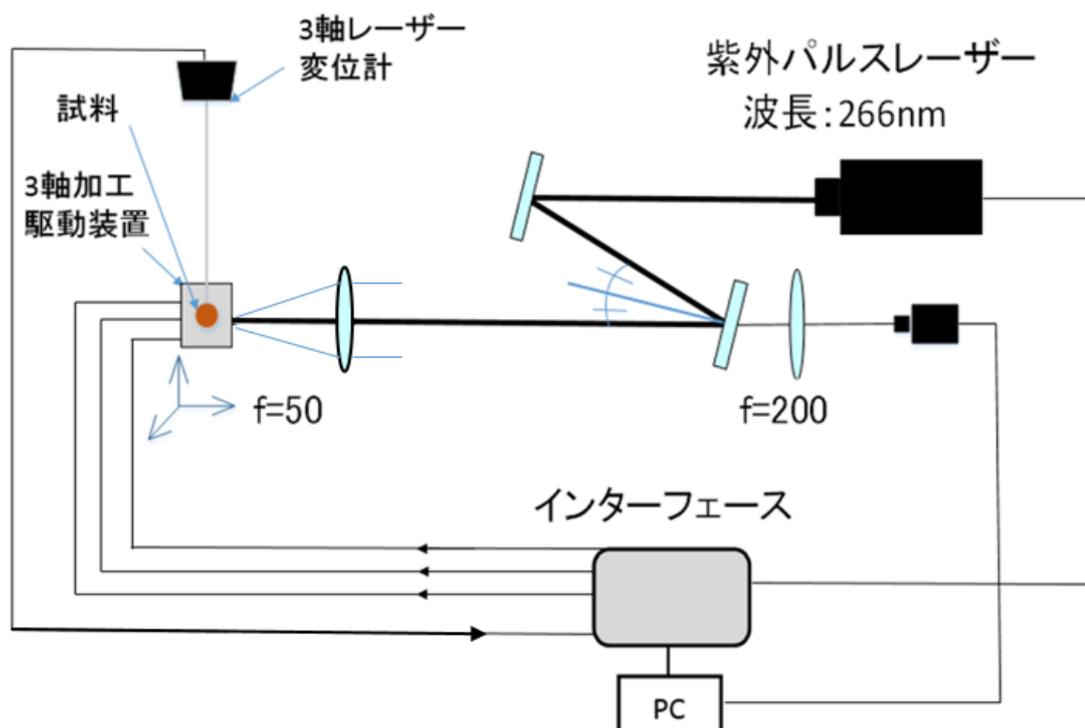


図 2・1 実験装置の概要

2.2 三軸加工駆動装置

三軸加工台は直線移動ステージであり，X 軸，Y 軸，Z 軸の三軸で構成されている．更にそこに，立体加工を行うために ω 軸を新たに追加した．その際に 5 ピンコネクタケーブルとステッピングモーターの配列を調べ正しく接続した．加工実験を行う際は，X 軸の 5 ピンコネクタケーブルを外し ω 軸をつないで行った．

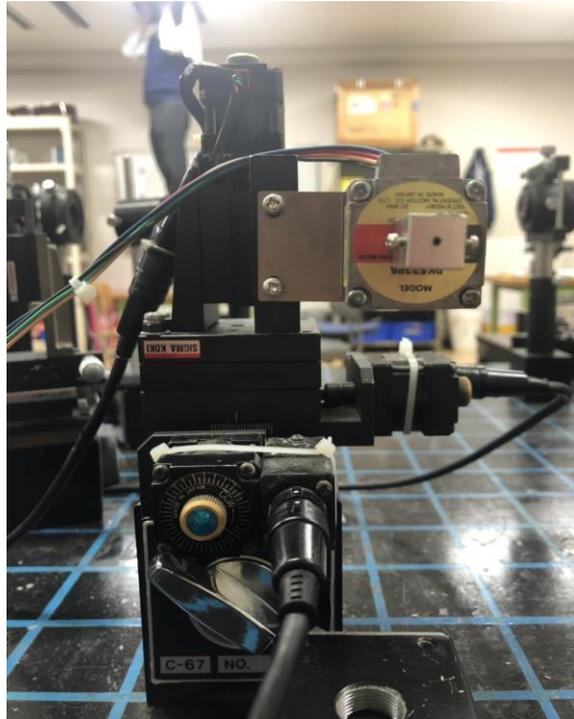


図 2・2 三軸加工台

2.3 インターフェース

パソコンとインターフェースを USB で繋ぎ，LabVIEW で作成したプログラムの信号が，インターフェース，ドライバ，三軸加工台，レーザー装置へ繋がり駆動する．またレーザー変位計で測定し出力される電圧を取り込み，LabVIEW にプログラムの信号を送ることが出来る．図 2・3 にインターフェースの外観を示す．



図 2・3 インターフェース

2.4 レーザー変位計

レーザー変位計とは、レーザーを出し、反射を読み取り、距離を測定するものである。今回使用した変位計は μ 単位で測定することができ、測定範囲は基準点から、上下35mmの間で計測することができる。測定深さの変化で電圧が変わり、インターフェースに電圧を送ることができる。xyz精密ステージにレーザー変位計を取り付け、 μ m単位で調整できるようにした。加工を行った面を90度回転させ、加工面に変位計をあて計測を行った。

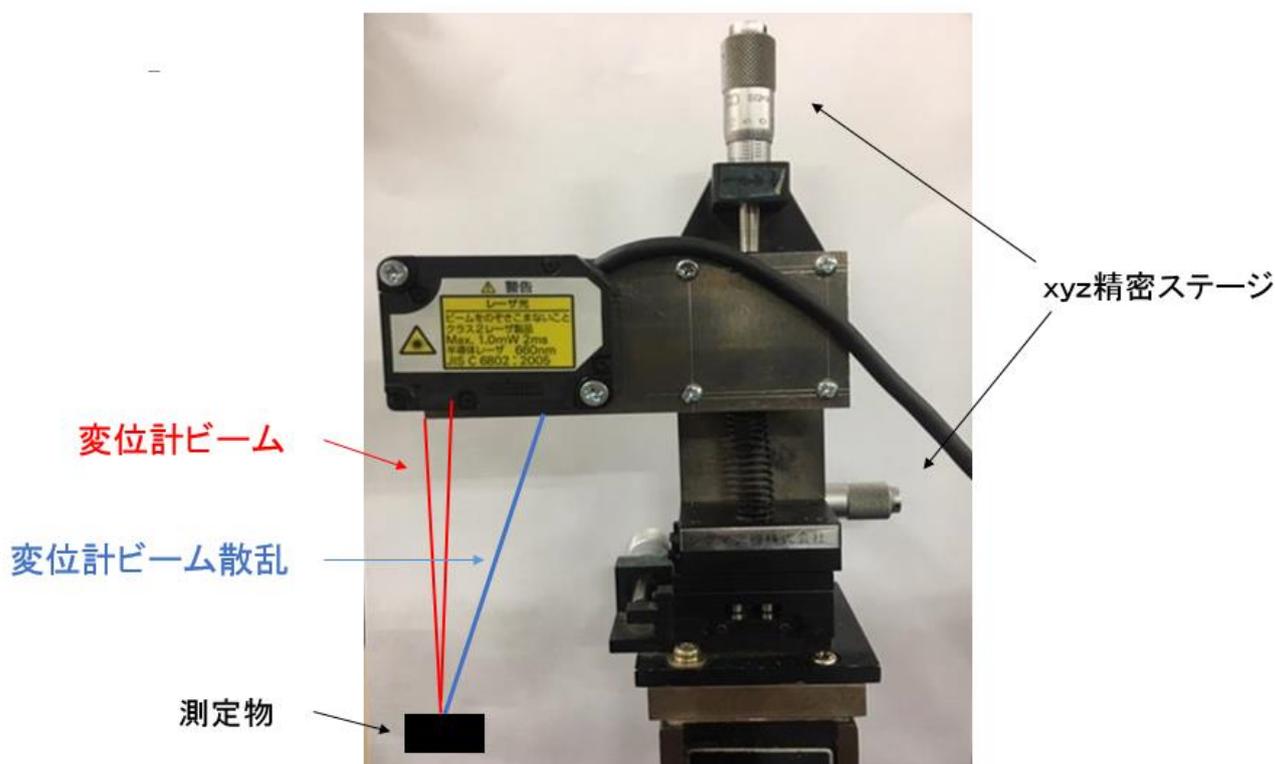


図2・4 レーザー変位計

2.5 紫外パルスレーザー

波長が1064nmのNd:YAGレーザーを、KDP結晶を用いて高調波を発生させ、波長を4倍波の266nmに変換した紫外レーザーである。パルス幅5nm、レーザーパワー5mjのものが約1mjになっていた。またビーム径は5mmである。

コントローラーを使用してインターナル操作で周波数、レーザーパワーを制御することができる。また、インターフェースに繋ぎLabVIEWを使用し、エクスターナル操作でショット数、周波数を制御することができる。



図 2・5 紫外パルスレーザー

2.6 LabVIEW

LabVIEW とは、プログラミング言語を覚える必要がなく、絵を描くようにしてプログラムを作成できるため、非常に使いやすいプログラミングツールである。プログラムを視覚的に認識でき、修正や変更が容易である。また excel にデータを取り込むことができるといった機能もある。今回は三軸加工台とレーザー装置の制御、レーザー変位計での測定値フィードバックを LabVIEW を用いて行った。

しかし、LabVIEW は Windows を介して制御を行うため、プログラム実行中に他の操作を行うと信号が乱れ場合誤動作する可能性がある。

2.7 イオンスパッタ

図 2・6 にイオンスパッタ装置の外観を示す。イオンスパッタ装置は、導電性のない試料を走査型電子顕微鏡で観察する場合、試料表面の帯電による像障害を防止するため金属コーティングすることを目的としている。

焦点調整で使用したポリイミド樹脂は導電性のない試料のため金属コーティング(金 Au)を行うことで SEM での観察を行うことができる。



図 2・6 イオンスパッタ装置

2.8 走査型電子顕微鏡 (SEM)

図 2・7 に走査型電子顕微鏡 (SEM) を示す。走査型電子顕微鏡 (SEM) は、0.3kv ~ 30kv で加速電圧が流れ、二次電子像及び反射像を 50 倍から 50,000 倍の倍率で試料表面の組成の観測ができ、フィラメント電流の調整、焦点調整は自動化されている。SEM は試料表面に加速した電子を照射し、その反射の様子を画像化することによって、光学顕微鏡では得られないような高倍率で試料表面を観察することができる。今回は焦点位置付近でのビーム径測定、球体加工を行ったシャープペンシルの芯を確認するのに利用した。



図 2・7 走査型電子顕微鏡 (SEM)

2.9 3次元光学プロファイラー

干渉計対物レンズを垂直方向に走査し、カメラ要素で光干渉強度のピーク位置を取得することにより、各画素間で相対的な高さの位置関係を所得する事ができる。滑面、粗面、平面、傾斜面、および段差を含む広範囲の表面を、簡単かつ迅速に測定できる。



図 2・8 3次元光学プロファイラー

第 3 章

立体加工

3.1 球体加工

3.1.1 円形プログラミング

LabVIEW を用いて、円形プログラミング作成を行った。

$s=\text{rad}$ だがステッピングモーターの 1 ステップ 0.72° の性質を利用して、一回転なのでステップ動作するので、 0.72° を rad 表記にした。0.00125644 とした値を s とする。
半径= r , n =回数とし

$$x = r \cos(sn) - r \cos[s(n-1)] \quad (1)$$

$$y = r \sin(sn) - r \sin[s(n-1)] \quad (2)$$

利用することで、円径にした。

また DAQ は負の値を読み取らないので、正の値に転換してよみこませた。

プログラミングを完成した際に、使用しているレーザーが原因不明の故障を起こしてしまい、使用できなくなったので、山岸研究室のレーザーを借り加工を行った。

3.1.2 平面での円加工

半径を $5000\mu\text{m}$ の円を加工台に取り付けたポリイミドに加工を行った。LabVIEW では少数点以下をどのように読み取っているかわからず、正確な円を作成することができなかった。

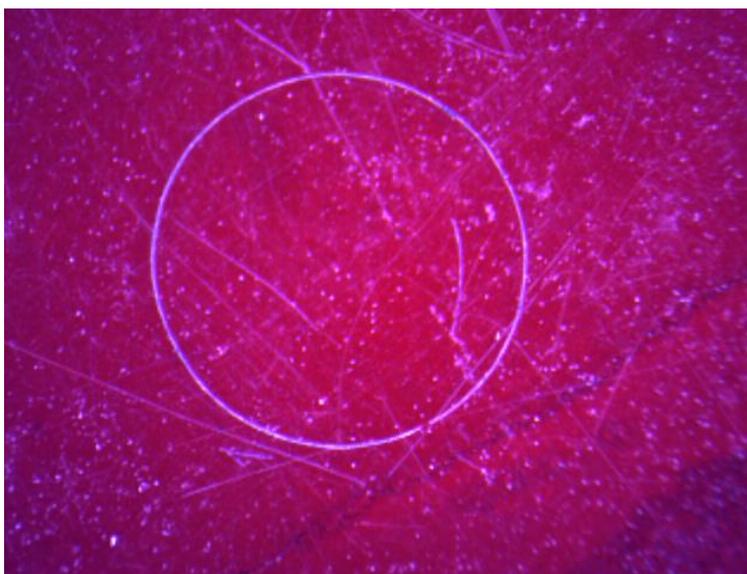


図 3・1 $r=500\mu\text{m}$ の円

3.1.2 山岸研究室レーザー性能

J40-Y70SC 532nm レーザーを借りて、実験を行った。波長 532nm レーザーパワー 1.1W・7000Hz パルス幅 80ns で実験を行った。
パワーがミラーを反すことにより、約 0.8W に減少した。

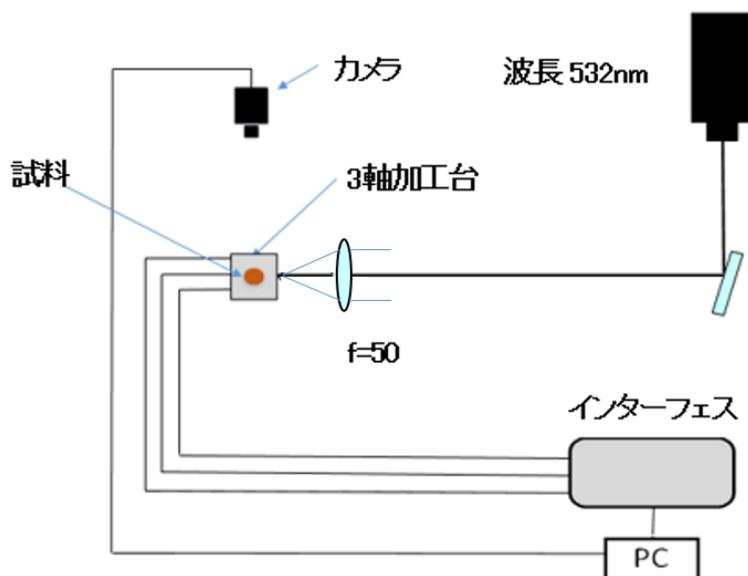


図 3・2 実験装置の概要

3.1.3 円柱加工

φ1.3mm のシャープペンシルの芯を φ1mm の加工台に取り付けるために、手で紙やすりを使用して削ったため、球体加工での回転軸を合わせるために行った。
レーザーを照射し続け、加工物を回し続け、カメラ上で加工物の上端にあて左右に動かした。

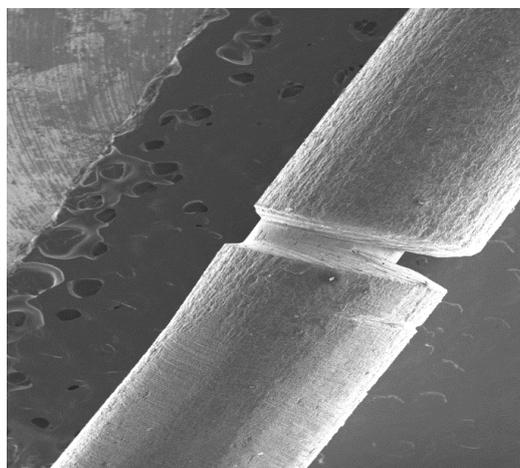


図 3・3 シャープペンシル芯 円柱加工

3.1.4 球体加工

円柱加工で作成した，円柱を球体にするために，3.1.1 で示した式のプログラムに回転を取り付け，回転させながら加工を行った．

シャープペンシルの芯では強度が足りず，すぐに折れてしまった．

シャープペンシルの芯が同一物質でできておらず，中に様々な物質が混ざっているためだと考えた．

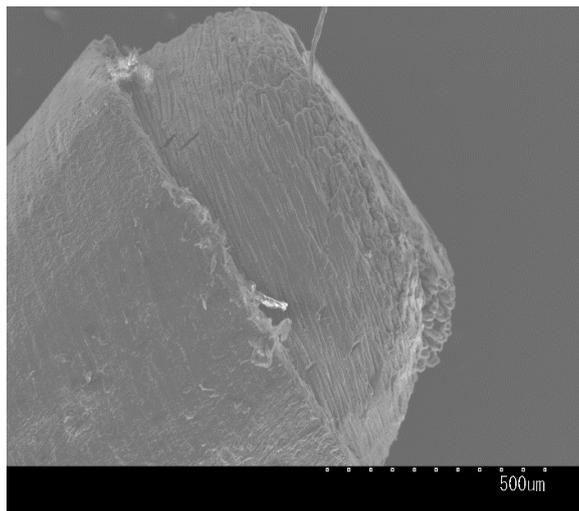


図 3・4 シャープペンシル芯 球体加工

第4章

フィードバック加工実験

4.1 焦点付近でのビーム系測定

4.1.1 実験材料

実験材料にはポリイミド樹脂を使用した。ポリイミド樹脂は蒸散に優れており、最終目的である立体加工を行う際ポリイミド棒を使用するために、今回の実験に使用した。

4.1.2 実験方法

今回の実験では、ある程度の焦点をあわせるため、蒸散をする際の音で焦点を探した。ある程度の位置を見つけるため手動で三軸加工台を動かし、蒸散の音が一番大きな位置を焦点とし、そこからあえて焦点の位置から三軸加工台を動かし焦点を外した位置から焦点であろう位置に向かってプログラムを用いて三軸加工台を動かした。

4.1.3 実験結果

焦点調整を行う際に使用した三軸加工台と、レーザー発射を制御した LabVIEW でプログラムを作成し、その数値入力画面、図 4・1 に示す。

まず、レーザーのショット数を指定し、X 軸、Y 軸を操作するプログラムを繰り返す事によって焦点を探る。そのプログラムの動作後、一度もとに戻すことによって、SEM での観測後焦点の位置に戻しやすくする。その後 Z 軸を操作し更に X 軸を動かすことによって並べて比較しやすいようにした。

入力した数値で、 μm 動くようになっている。

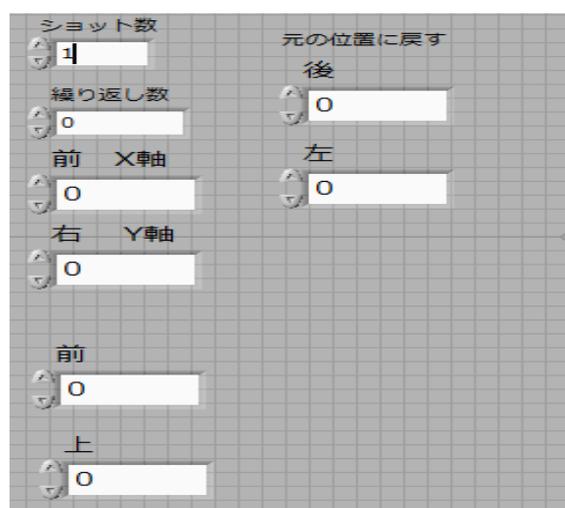


図 4・1 焦点調整プログラム



図 4・2 SEM による焦点調整実験結果

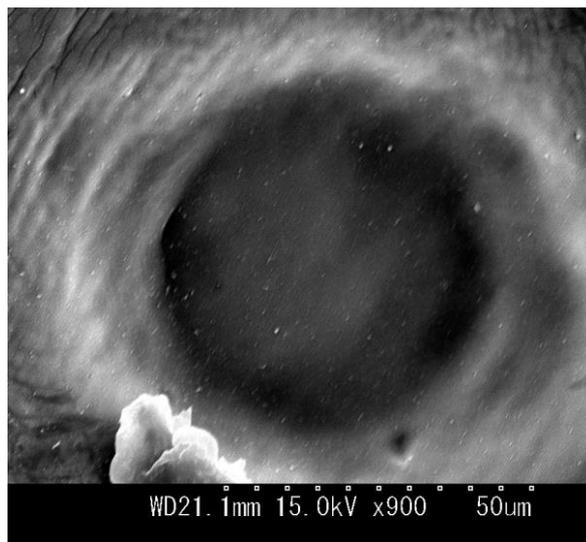


図 4・3 SEM による焦点位置での観測結果

図 4・2 に焦点調整を行った際の SEM の画像を示す。レーザーショット 100 発照射し X 軸方向に $100\mu\text{m}$ 動かし、Y 軸方向に $150\mu\text{m}$ 動かすプログラムを 10 回繰り返した後、元の位置に戻し、更に前に動かし比較するために X 軸方向に $1000\mu\text{m}$ 動かし、Z 軸方向に $300\mu\text{m}$ 動かした。この動作を 3 回繰り返した。

照射回数を 100, 50, 40, 30, 20, 10, 5 と変化させできるだけレーザーでの穴が掘れていない円になっている部分を探した。

この結果、約 $50\mu\text{m}$ ほどレーザーが絞れていることがわかる。

4.2 変位計レーザーの計測実験

4.2.1 集光距離測定

計測する際に、光検出器、三軸加工台、オシロスコープを使用し、図 4・4 に示すように設置した。仕切板からレーザー変位計の距離を測定し、オシロスコープで測定。20% から 80% の範囲での傾きを計算し、縦、横共にグラフ化し、集光される距離の測定を行った。

また、仕切板の移動距離、移動速度は一定になるように LabVIEW を使用し、三軸加工台を動かした。

オシロスコープで測定する際に、ノイズを減らすため光検出器の前にアテネーターを使用した。

z はレーザー遮断板移動距離であり、 x はレーザー光遮光板の相対値である。

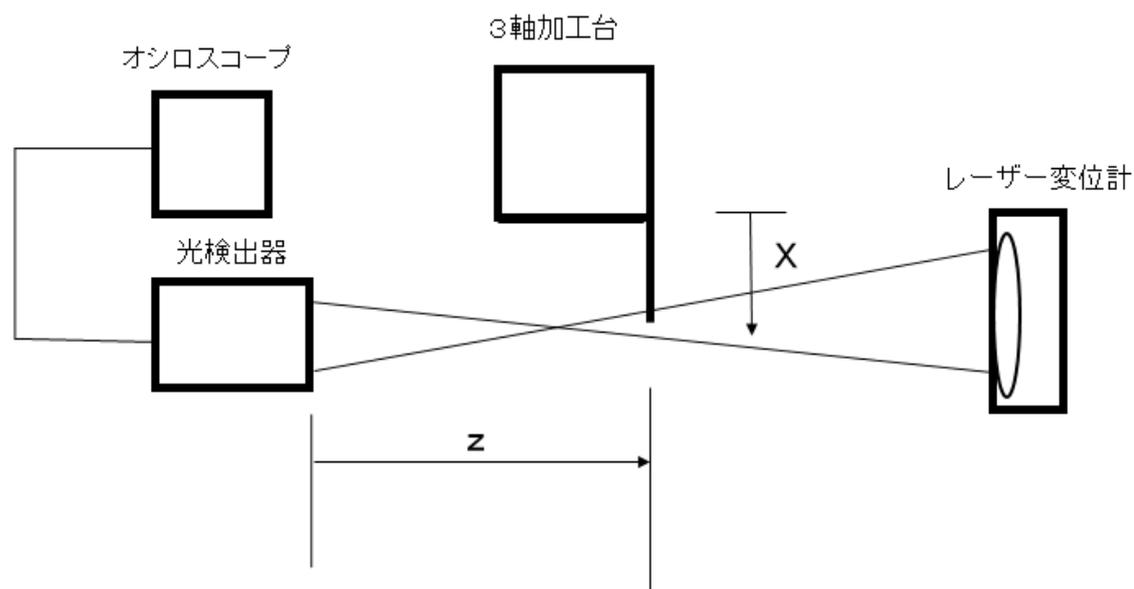


図 4・4 実験装置の概要

横の仕切版の移動距離を x 縦の仕切版の移動距離を y とする。

図 4・5 横 x 113mm で $40\mu\text{m}$ の最高集光径があり、図 4・6 の縦 y は、112mm で $25\mu\text{m}$ の最高集光径があった。

図 4・5、図 4・6 よりレーザー径の形は楕円形であり、112mm の付近では円になっていることがわかる。

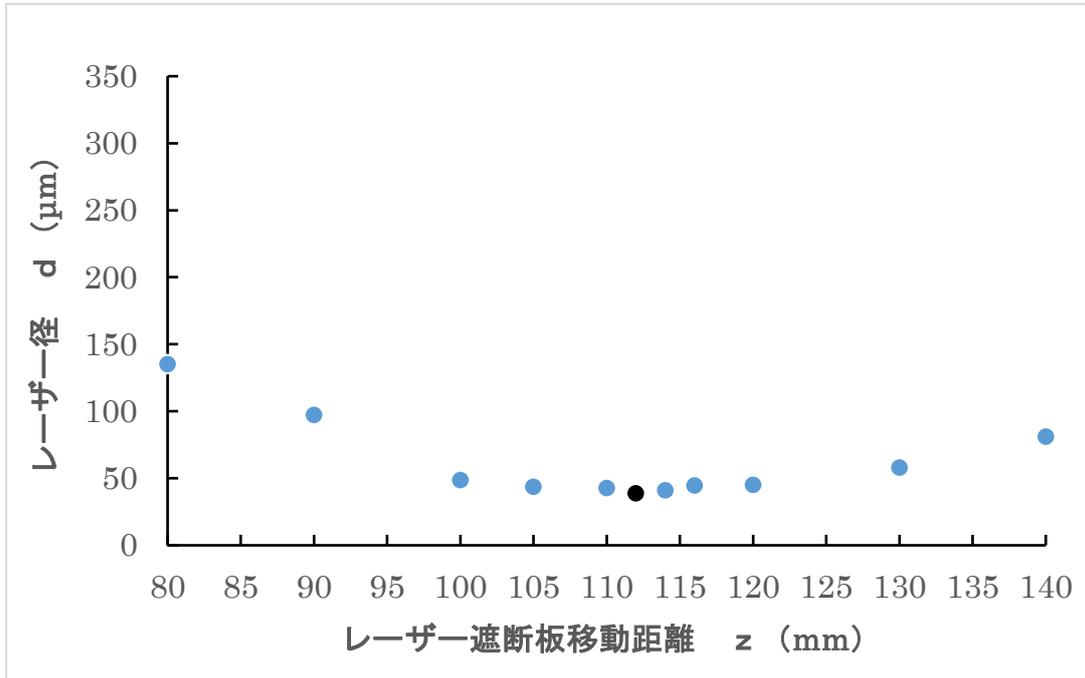


図 4・5 レーザー変位計測定 (横方向)

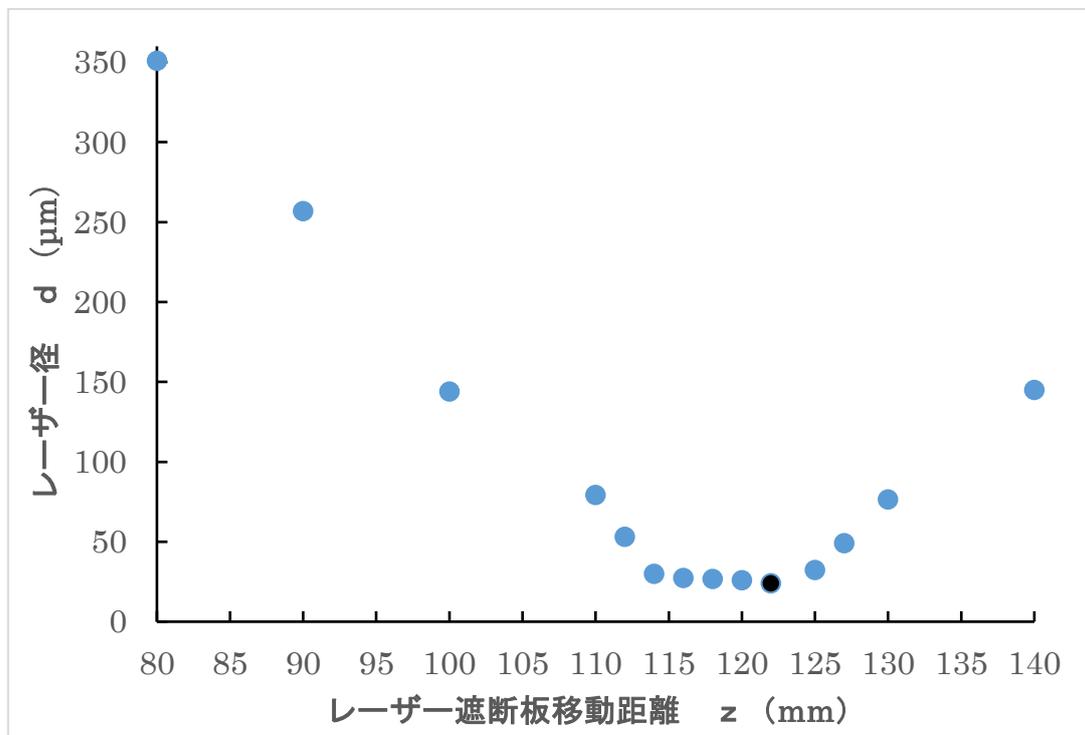


図 4・6 レーザー変位計測定 (縦方向)

4.2.2 レーザーの最小集光径測定

レーザー径を測定するために、レーザー径を φ として φ の式、

$$\varphi = e^{-\left(\frac{r^2}{a^2}\right)} \quad (1)$$

を使用する。図4での横の径を x 、縦の径を y とする。

$$r = x + y \quad (2)$$

また、 $a=20$ と仮定し、

$$\varphi = e^{-(x+y)^2/20^2} \quad (3)$$

とする。また x, y が小さく縦と横の径が同じところは、113mm で $40 \mu\text{m}$ とする。ガウス関数を使用し、

$$\varphi = \iint e^{-(x^2+y^2)/400} dx dy \quad (4)$$

より範囲を指定することで以下の図4・7が作成される。

20%~80%での仕切り移動距離は、 $24 \mu\text{m}$ なので実際のレーザー径の大きさは $30/24*40=50$ より $50 \mu\text{m}$ となる。

また図4・7より、 $a=20$ で $\varphi = e^{-1}$ になることからレーザー径は8%~92%を測定することで得られる。

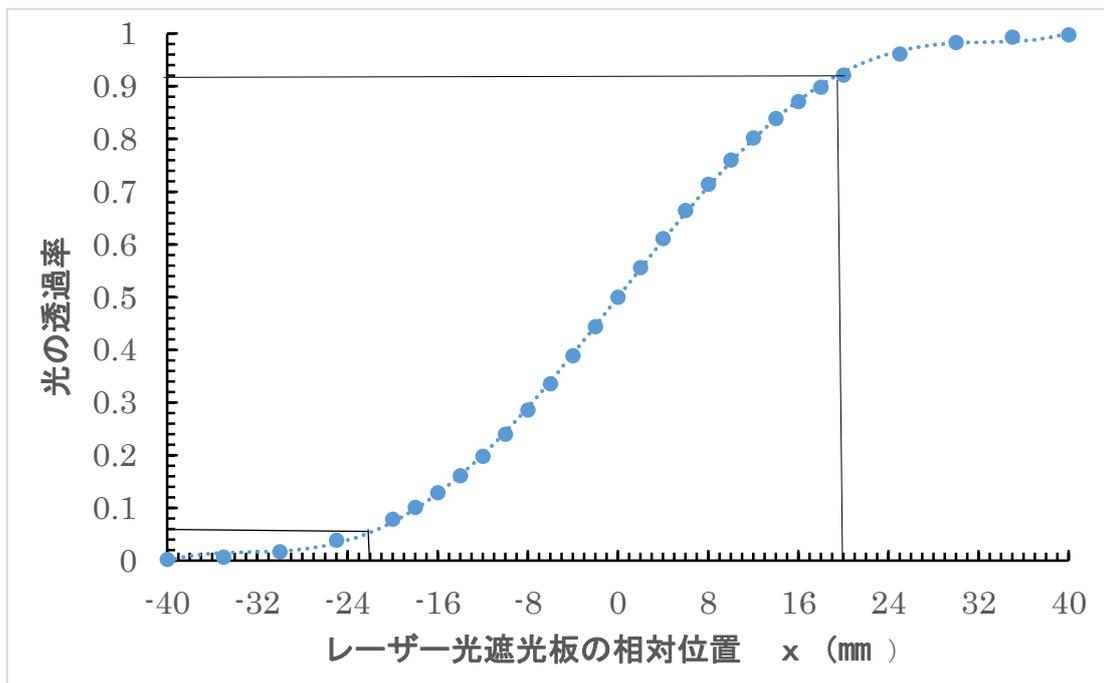


図 4・7 レーザー光遮光板の相対値に対する光の透過率

4.3 変位計出力電圧校正

変位計出力電圧の校正を行うために変位計のレーザーを加工物に当て、手動で変位計の高さを手動で $10\mu\text{m}$ ずつ下げ出力された電圧を、LabVIEW で計測し $100\mu\text{m}$ まで下げる実験を行った。この実験を 5 回繰り返し平均した電圧取り校正を行った。

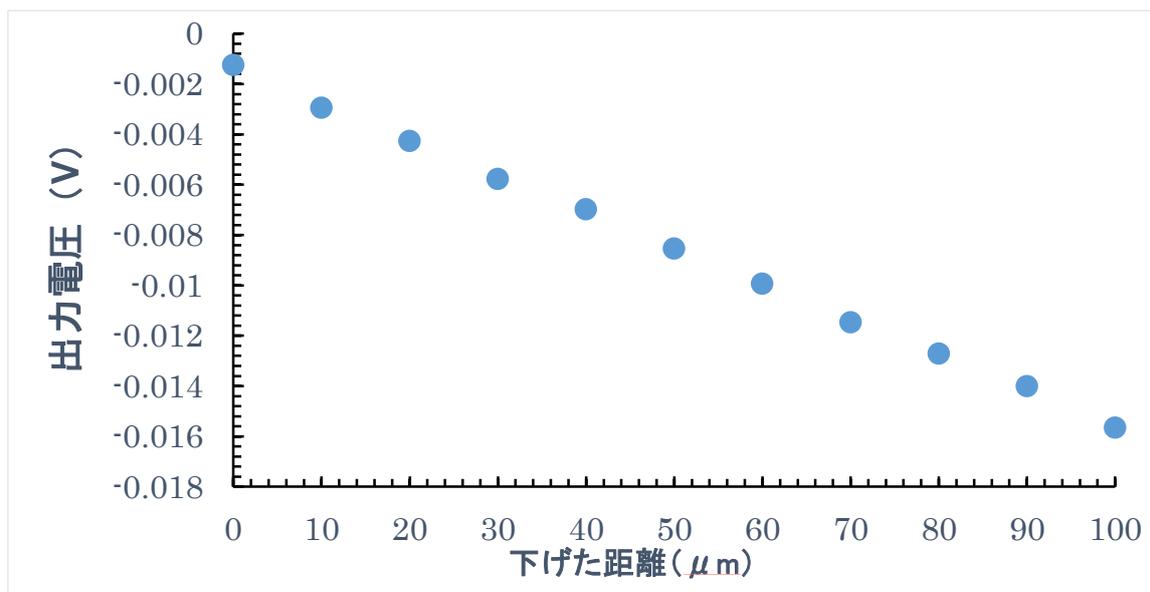


図 4・8 レーザー変位計の校正

グラフから読み取った傾き 1.41×10^{-4} を m として、その値から校正値を

$$k = \frac{1}{m} = \frac{1}{1.41 \times 10^{-4} \text{ (V/}\mu\text{m)}} = 7.09 \times 10^3 \text{ (}\mu\text{m/V)} \quad (5)$$

上式より k を算出する.

この値を用いて、加工の際の加工深さの目標値を決定する.

また近似線と、実際の値を計算した結果、深さ距離の標準偏差は約 $1 \mu\text{m}$ となった.

4.4 5点穴加工

4.4.1 実験方法

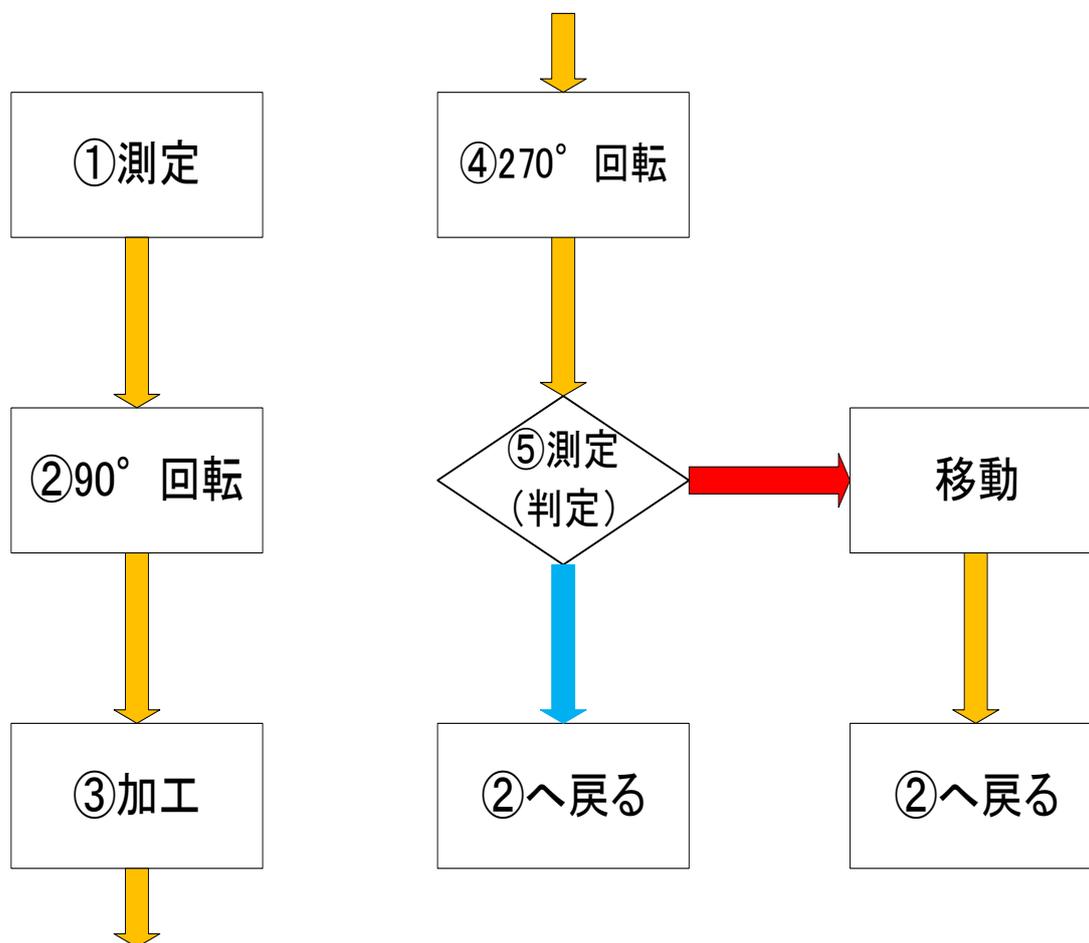


図 4・9 フィードバック加工のフローチャート

今回の実験では、3軸加工台に取り付けたアルミニウムにレーザーを照射し実験を行った。直径約 $50 \mu\text{m}$ の円形にレーザーを絞ったものを、加工深さ $80 \mu\text{m}$ を目標値とし目標値の電圧が出力されると $25 \mu\text{m}$ 横に移動しこれを 5 点分加工した。このときレーザ

ーは 10Hz で 10 発ずつ照射を行った。

また、レーザーで加工した箇所を変位計で計測する際に、変位計のレーザーは、加工のレーザーと同じ方向から当てると、反射の光が読み取れず、計測できないため加工物の真上から測定を行うようにレーザー変位計を取り付けた。

加工台の回転軸を利用し、ステッピングモーターの特性である 1 ステップ 0.72° を利用し、125 ステップでアルミニウムを 90° 回転させ測定を行った、判定され目標まで加工できていたら横に移動する。加工できていなければ、同じ方向に回転させたいため、375 ステップで 270° 回転させ、加工を再び行う。

4.4.2 実験結果

加工の際の目標の加工深さを $80\mu\text{m}$ とし、実際にフィードバックができ、1 点目が $80\mu\text{m}$ に到達されると、次の点に移動し変位計から電圧が出力されており、5 点分データが取れていた。図 4・10 からわかる通り、2 点目 3 点目 4 点目は重なるの部分があるため $80\mu\text{m}$ に到達するのが早くなっている。

このグラフでは 2 点目 3 点目 4 点目では 1 点目と 5 点目に合わせるように $80\mu\text{m}$ を超えた数値で継続してグラフを作成している。

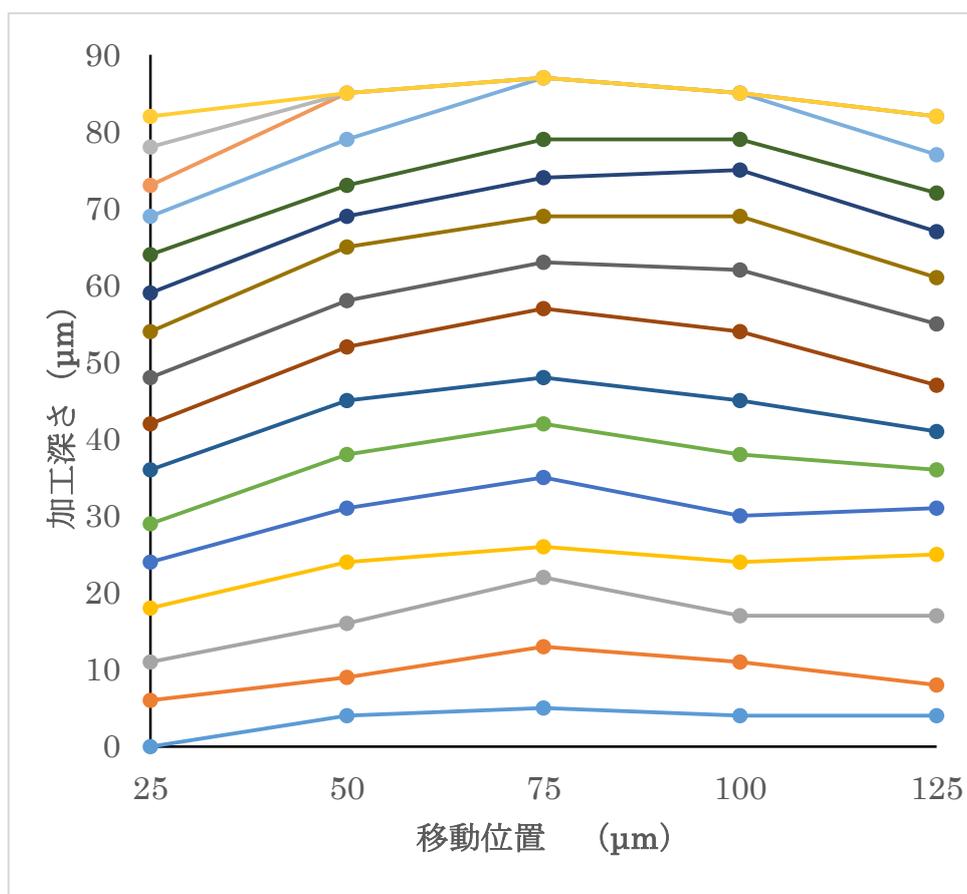


図 4・10 目標値へのフィードバック動作確認

4.4.3 3次元光学プロファイラーによる解析

実際に3次元光学プロファイラーで解析したものを、図4・11 図4・12に示す上のグラフは縦に引いた白線部分を解析したものです。

およそレーザーのビーム径通りの直径 50μ で深さが約 75μ の穴で穴の底は平らになっていることがます。

下のグラフは加工点移動方向を解析したグラフである。点の重なりがある中心付近は平らになっていることがわかり、かなりの精度が出ている。

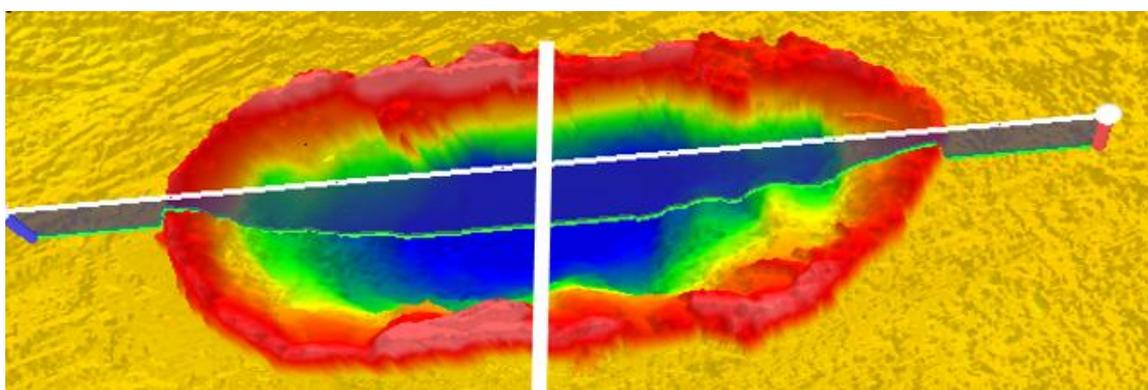


図4・11 3Dプロファイラーによる解析図

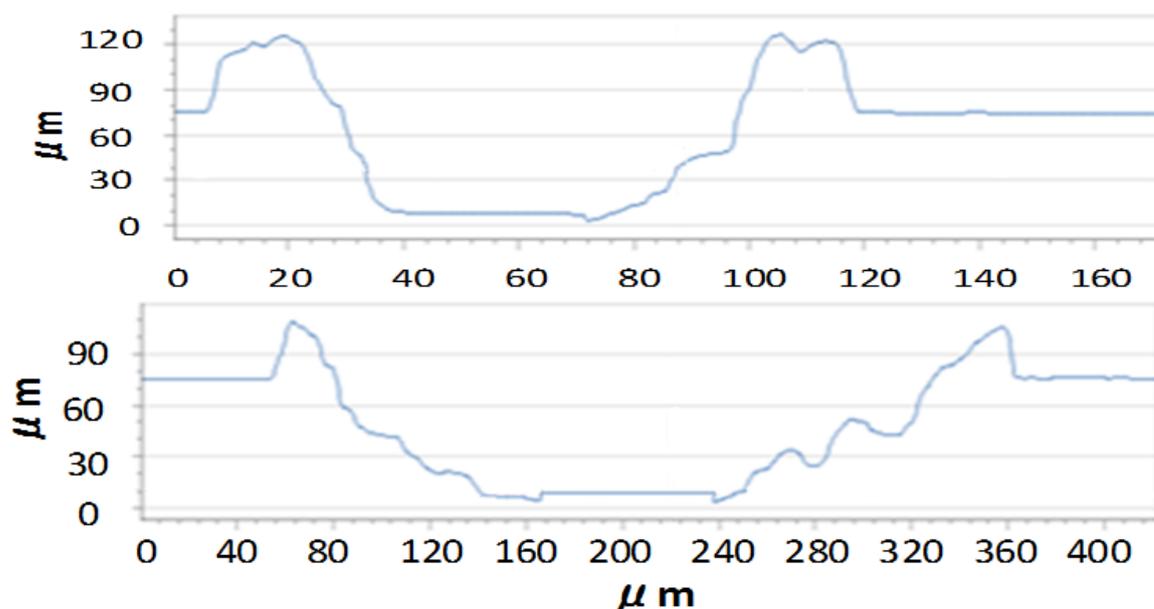


図4・12 5点での3Dプロファイラーによる解析

4.5 平面でのフィードバック実験

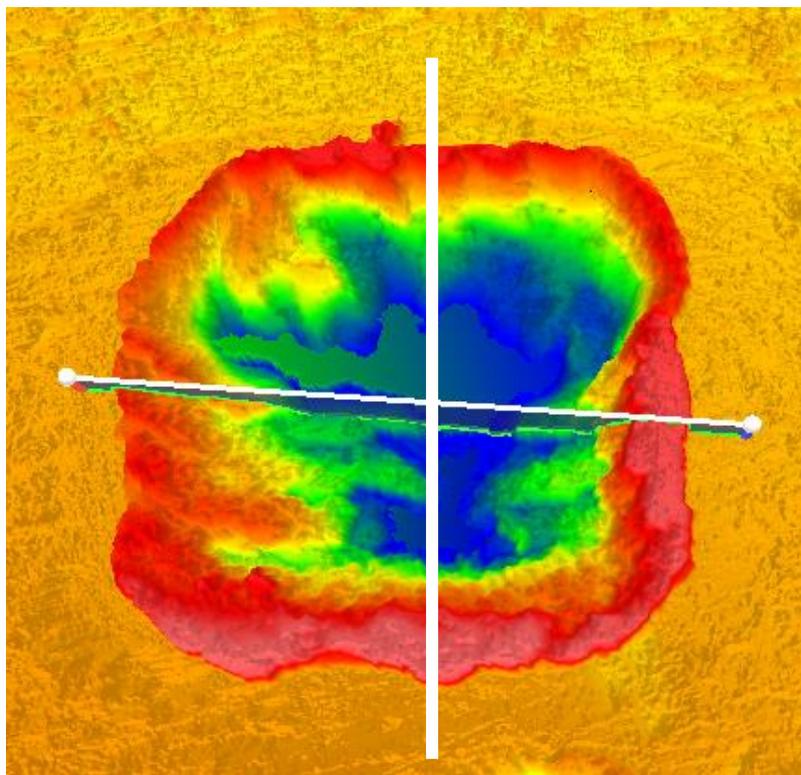


図 4・13 5点平面での3Dプロファイラーによる解析図

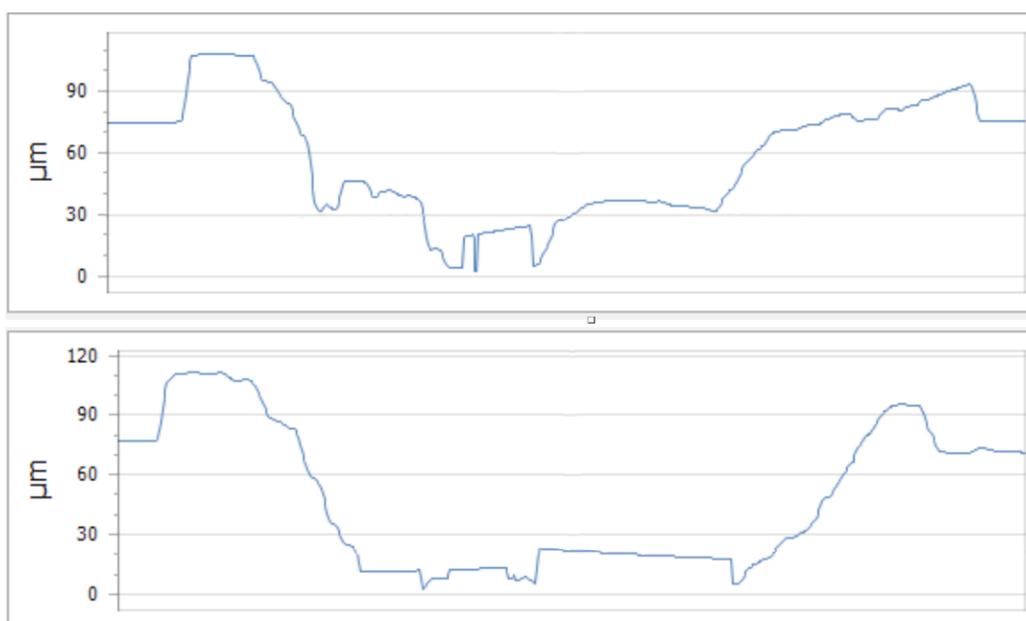


図 4・14 5点平面での3Dプロファイラーによる解析データ

5 点の連続フィードバックを縦 5 点，横 5 点 25 マイクロメートル動かし
平面のフィードバック加工を行った．3 次元光学プロファイラーによる解析結果を図
4・13 図 4・14 に示す．

上のグラフが 3D プロファイラーの線を解析したものを示し，下のグラフは，白線部分
を示したものである

5 × 5 の平面を加工結果として，フィードバックとして動作させることができたが，点
の重なる範囲が多く，線加工のときよりも精密にできておらず，深さが均一になってい
る箇所が少なかった．

原因として，レーザー変位計のビーム径平均をとっている可能性があり，点と点の重
なりが多い平面の加工では，正確に測定できていない可能性が考えられる．

第 5 章

結言

今回の研究結果として以下の 3 項目が挙げられる.

- (1) ステッピングモーターを用いて正確ではないものの平面での円を作成の実現
- (2) レーザー変位計を用いて数 μm の誤差はあるものの, 目標とした深さにフックを用いて制御し加工の実現
- (3) レーザー変位計の測定、紫外レーザー、LabVIEW、3 軸加工台を利用したフィードバックの実現

また今後の展望として以下のことが挙げられる

- (1) 任意の形状をさらに多くの点で加工を行う.
- (2) 荒削りと精密に削りを使い分け, 加工時間の短縮を行う.
- (3) 平面での加工を行う際, 精度の向上を行う.
- (4) 回転軸を利用して立体的な加工をフィードバックを用いて行うことでレーザー旋盤を可能にする.

参考文献

- (1) 栗田 航, 「紫外パルスレーザーによる加工精度限界の研究」, 福岡工業大学工学部
知能機械工学科平成 29 年度卒業論文

謝辞

本研究ならびに論文の作成に際し数々のご指導を頂いた河村良行教授に深く感謝の意を示します。また研究室の皆様に深く感謝の意を表します。

球体加工の際レーザー装置を貸して下さった山岸里枝准教授, 山岸研究室の皆様に深く感謝の意を表します。

また, エレクトロニクス研究所にて計測センター担当の宋麗香氏にはイオンスパッタリング装置, SEM, 3次元光学プロファイラー等の使用に関してご指導を頂いたことに感謝の意を表します。

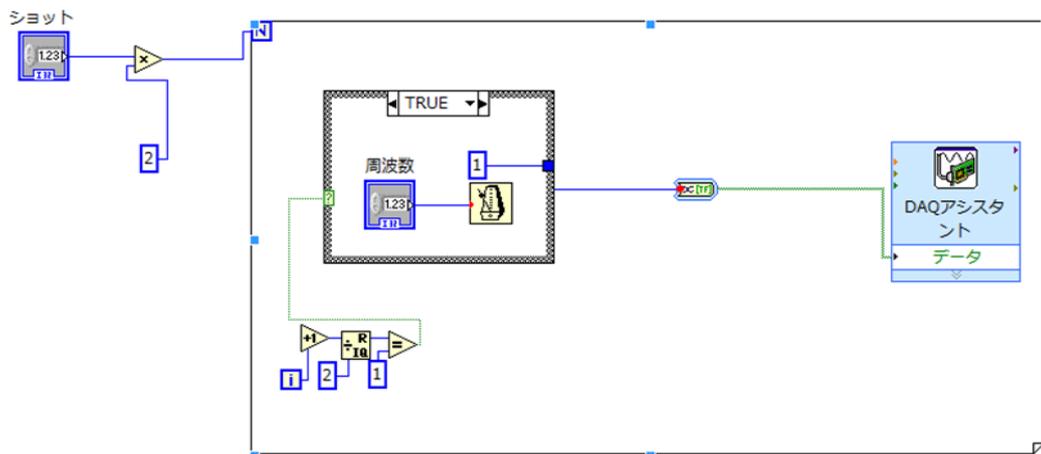
実験装置の製作にあたり, ご指導ご協力を頂いた, 工作センターの方々及びものづくりセンターの方々に感謝の意を表します。

最後に本研究に対して適切なお助言を頂いた皆様に深く感謝の意を表します。

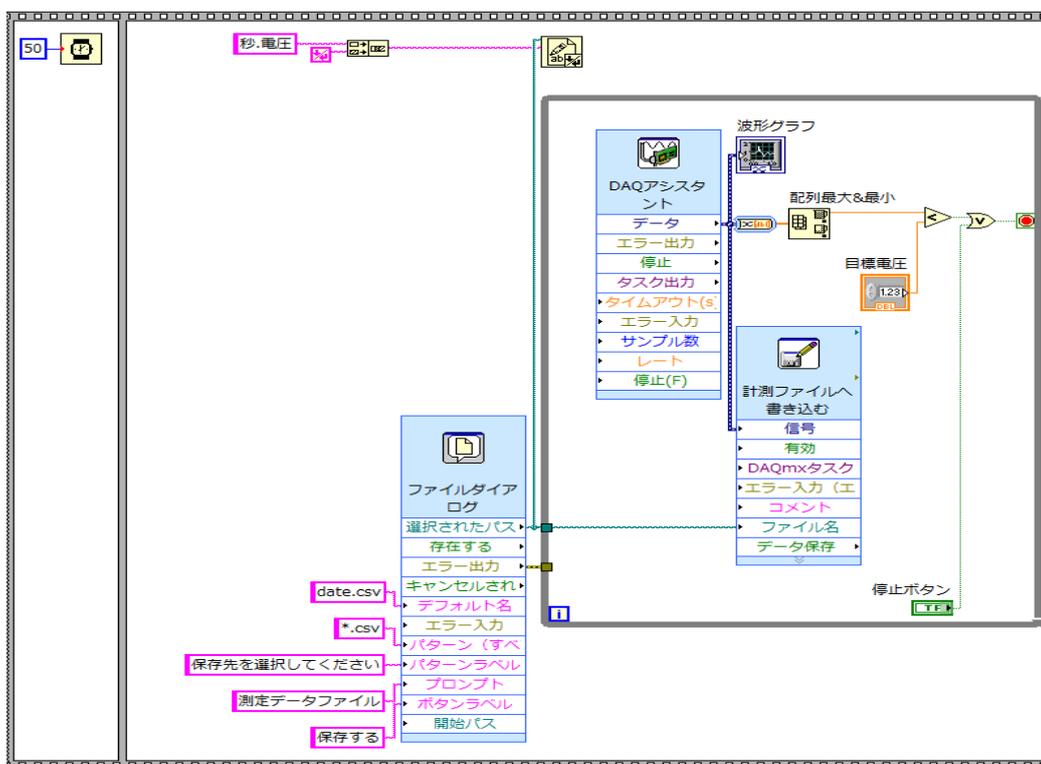
付録

- 付録 1 レーザー発射プログラム
- 付録 2 データ収録プログラム
- 付録 3 送風冷却器
- 付録 4 紫外パルスレーザーコントローラー
- 付録 5 レーザー電源装置 INT・EXT スイッチ

付録1 レーザー発射プログラム

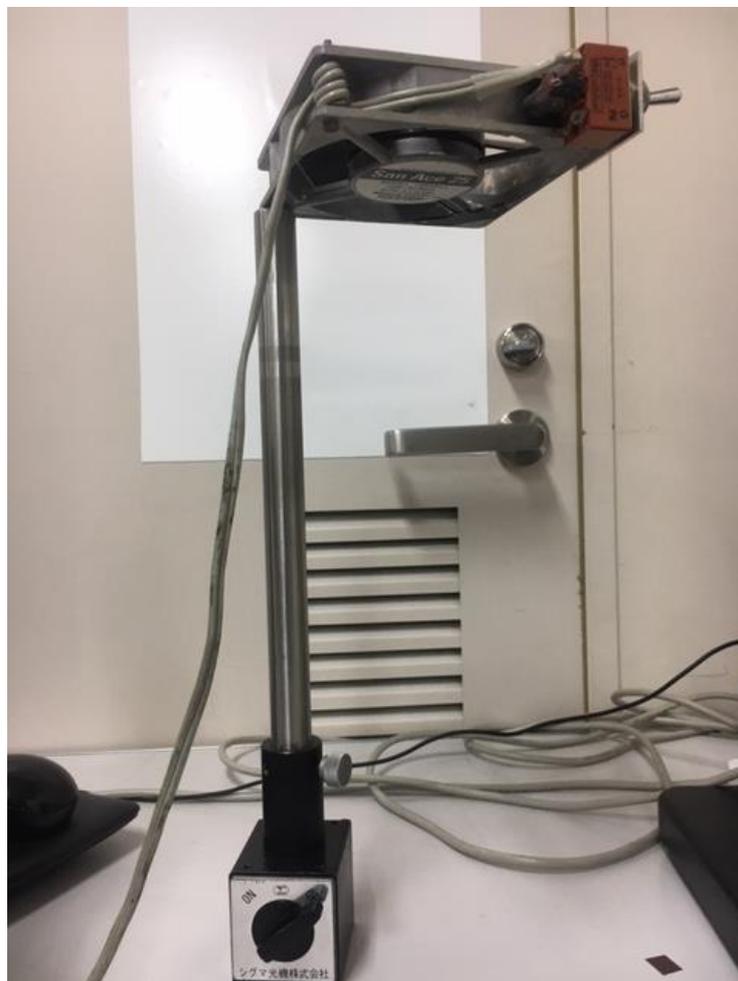


付録2 データ集録プログラム



付録 3 送風冷却器

三軸加工台は熱膨張が発生するため送風を利用して三軸加工台の冷却を行った。



付録4 紫外パルスレーザーコントローラー

レーザーの電源を入れた後、レーザーパワーと、周波数を操作することができる。今回の研究では、加工した際に、目印を最初につけるために、レーザーを同じ箇所に照射する際に利用した。



付録 5 レーザー電源装置裏面の INT・EXT スイッチ

FLASHLANP の FIRE にコードを繋ぎ INT と EXT のスイッチを変えることで、切り替えることができる。

