

周波数干渉計を用いたレーザー加工深さ計測システムの開発

杉浦 成海

平成 33 年 3 月 4 日

1 序論

レーザー加工技術は精密な切断、溶接加工などに用いられている。この加工法の特筆の 1 つに加工時の穴径に対する深さの比が大きく取れるというものがある。具体的には $100\mu\text{m}$ 程度の材料への入射口径でも、 $200\sim 300\text{mm}$ もの厚みが切れてしまう。しかし、その一方で、レーザーと物質の相互作用を考えると、いわゆる遮断密度が存在し、よく用いられる波長 $1\mu\text{m}$ のレーザー光は固体密度の数百分の 1 の点で跳ね返されている。したがって、前述の長い穴が開くためには、レーザー光が融けた材料内を伝播して進んでいくことになっているが、金属で囲まれた内部の現象となるために、その浸入過程は定量的に評価しにくい状況にある。レーザーを物体に照射することにより起こる発光、融解などを含む相互作用の計測は、現在、エネルギーやパルス幅など一部の条件を決めた単一ショットベースのレーザーを照射し、その結果を分光計測などによって評価している。本研究では、相互作用の中で融解作用に着目し、加工中の金属試料の融解状況を随時観測するために、加工に用いるレーザーとは別に参照用のレーザーを照射し、加工による参照レーザー光の光路長の変化にて生じる干渉縞の変化を分光計測によって評価する方式を作成した。具体的には、加工に用いるレーザーと同軸に計測用レーザーを試料部に導入し、その最深加工部空の反射光を参照光学系からの光と干渉させ、深さ情報をえる。計測用レーザーには、モード同期 Yb レーザーの 2 倍高調波を LBO により得て、加工部での発光と区別しやすくするために、単一モードファイバーで干渉計を構成し、試料からの反射光もこの単一モードに入ったもののみ観測対象とする。取得されたデータは、相互作用によって発生する種々の要素について一定の出力結果を得るための入力予測を可能とするシステムを構築するために用いることを想定している。

2 原理

2.1 計数法

マイケルソンの干渉計においてビームスプリッターとミラーの位置を変化させることで検出器で観測する干渉縞の明暗が正弦波状に変化する。これを用いて一方のミラーの位置を固定したときのもう一方のミラーの移動距離を検出器中の干渉縞の数を計数することで測定する方法を計数法と呼ぶ。[5] ミラーの移動距離 ΔL 中に干渉縞の明暗のサイクルが N 回観測されたとすると、移動距離は大まかに式 (1) で与えられる。

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2} N \quad (1)$$

本研究で用いる手法はマイケルソンの干渉計を出た単色光を回折格子によって波長分散し、周波数領域ごとの干渉縞の変化をその間隔を測ることで定量化し、光路長差と関連付けることを目的とする。干渉縞の強度の周期に関しては式 (??) で示されている。波長分散によって λ のとりうる値がレーザー光のもつ周波数領域内で連続的に存在することで、光路長差が大きくなるごとにその公約数となる λ と m の組み合わせが増加するため、検出器となる CCD カメラ上で干渉縞の間隔が狭まっていく。

3 模擬の実験装置の作成

本研究で用いる装置は、とりうる周波数範囲が限られた単色光のレーザーを一方のミラーを試料金属としたマイケルソンの干渉計に入射し、得られた干渉光を回折格子によって周波数ごとに分光し、検出器の CCD カメラ上で横方向を光の周波数として観測できるように施した上で範囲内の各周波数の干渉縞の明暗を同時に観測し、移動距離に対する干渉縞の変化ないし干渉

縞の変化に対する移動距離の測定を可能にすることを目的とする。この手法は溶接中の金属の掘削状況をリアルタイムで観測することに活用される予定である。実際に既存のレーザー溶接装置に組み込む前に、模擬の装置を作成し、分光された干渉光の移動距離に対する干渉縞の明暗の変化を観測した。

3.1 分光干渉

干渉させた光を回折格子で分光することにより、レーザー光が有する各発振周波数の干渉を CCD カメラで観測することができる。干渉計のミラーの位置を変化させたときの周波数領域における干渉縞の間隔を測定した。実験図は図 (1) の通り。

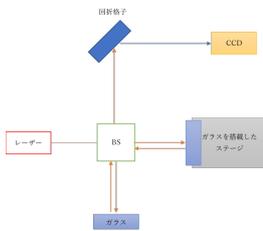


図 1: 分光干渉を観測する装置

3.2 分光干渉の干渉縞の間隔

光路長差を増加させると、観測される周波数領域内の干渉縞の本数が増え、その明暗の間隔が次第に縮小する。ある光路長差の場合の干渉縞の隣り合う暗線の間隔を測定した。

3.2.1 手順

1. 干渉計部分のガラス基板をミラーに変更し、干渉光を回折格子を含む分光器に入射させ、回折の 6 次光を集光させ CCD カメラで観測した。
2. 干渉計のミラーの位置を変化させたときの周波数領域の干渉縞の間隔を測定した。

3.2.2 結果

光路長差が $0 \sim 12000 \mu\text{m}$ の位置での周波数領域の干渉縞の間隔の変化は図 (2) の通り。

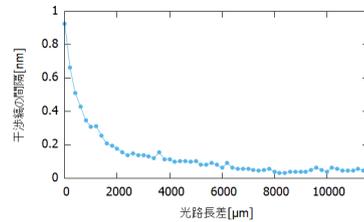


図 2: 周波数領域の干渉縞の間隔

両対数グラフで表し、プロットされた点の累乗近似曲線を求めた。結果は図 (3) の通り。

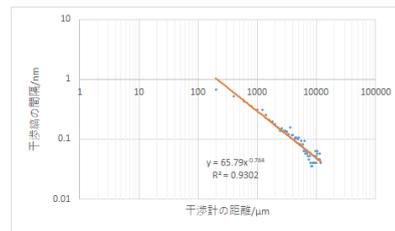


図 3: 周波数領域の干渉縞の間隔の両対数グラフ

近似式は、光路長差を l 、干渉縞の間隔を h とし式 (??) で表される。

$$h = 65.79l^{-0.784} \quad (2)$$

4 実験装置の作成

超短パルスレーザーを変調により緑の可視光とし、シングルモード光ファイバーに入射した。シングルモード光ファイバーを通るレーザー光をビームスプリッターによって 2 分割し、一方を平行移動可能なステージに乗ったミラー、もう一方を試料金属の SuS 板にそれぞれ等距離から入射させ、その反射光を取り込んだ干渉する光を回折格子により周波数領域ごとに分離し、模擬の装置と同様にレーザーが含む発振周波数ごとの干渉縞を CCD カメラで観測する装置を作成した。実験図は図 (4) の通り。

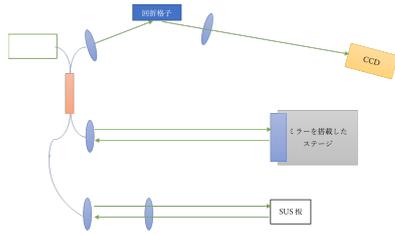


図 4: 実験図

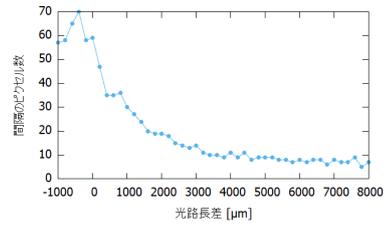


図 8: 周波数領域の干渉縞の間隔

4.1 試料金属の干渉縞の観測

4.1.1 手順

1. ミラーを搭載したステージを光軸方向に距離を変化させた.
2. 干渉計のミラーの位置を変化させたときの周波数領域の干渉縞の間隔を測定した.

4.1.2 結果

CCD カメラで観測された各光路長差に対応する周波数領域の干渉縞の様子は図 (5)~(7) の通り.

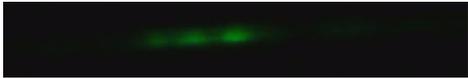


図 5: 光路長差 $0\mu\text{m}$ の位置での周波数領域の干渉縞

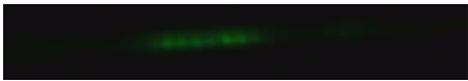


図 6: 光路長差 $2000\mu\text{m}$ の位置での周波数領域の干渉縞



図 7: 光路長差 $4000\mu\text{m}$ の位置での周波数領域の干渉縞

光路長差が $-1000 \sim 8000\mu\text{m}$ の位置での周波数領域の干渉縞の間隔の変化は図 (8) の通り.

光路長差は干渉計のミラーを搭載したステージのマイクロメータの読みを参照した. 実際の光路長差が 0 の位置は光路長差 $-400\mu\text{m}$ の位置と推測される. この装置の状態では光路長差をさらに伸ばした場合 CCD カメラの画像のピクセル強度から干渉縞の間隔を測定することが困難であった.

改めて $-400\mu\text{m}$ の位置を光路長差 0 の位置とし, 両対数グラフで表し, プロットされた点の累乗近似曲線を求めた. 結果は図 (9) の通り.

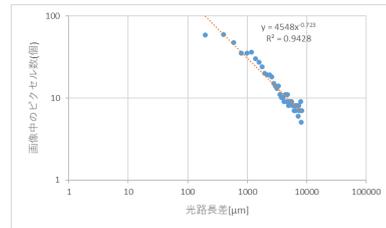


図 9: 周波数領域の干渉縞の間隔の両対数グラフ

近似式は, 光路長差を l , 干渉縞の画像中のピクセル数の間隔を h とし式 (3) で表される.

$$h = 4548l^{-0.723} \quad (3)$$

5 考察

干渉縞の間隔の変化を表す近似式について, 模擬の装置では l の乗数が -0.784 , 実際の装置では h の乗数が -0.723 であった. 以下の推論により, 理論上の乗数は -1 であることが予想される.

分光されたレーザー光について, 周波数領域内で観測される最大の波長が 532.0nm , 最小の波長が 530nm だったとする. $\lambda = 530, 532\text{nm}$ のどちらの場合についても干渉の強まる最小の光路長差 $2(l_1 - l_2)$ は $281.96\mu\text{m}$

であり、以降もその整数倍が条件を満たす。光路長差を $281.96\mu\text{m}$ 間隔で等倍に増加させるとき、双方の波長についてこれを満たす m の差をとると 2 ずつ増加する。分光により波長がこの範囲のあらゆる値をとると考えると、 m の数が強め合う干渉縞の数であり、その逆数が図 (10) のように干渉縞間隔になる。

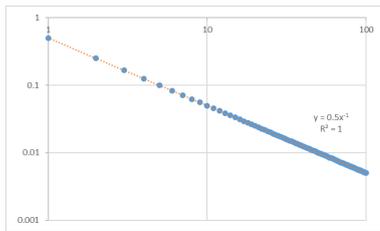


図 10: 予想される周波数領域の干渉縞の間隔の両対数グラフ

この両対数グラフのプロットは係数が最大周波数と最小周波数の差に順じた x^{-1} の曲線をとることになる。今回の結果では、どちらの場合についても -1 からやや小さい値となっている。この状態で安定するのであれば光路長差と干渉縞間隔を紐づけた結果を用いて溶接の深度を測定することは可能であるが、変化の割合が小さければその分微小な変化に反応を示すことが難しい。また、現在の拡大率だと 1cm 未満の光路長差で干渉縞間隔を画像のピクセル数で表せる限界になってしまう。光路長差が 0 の点を試料金属を変更するなどの動作を挟んでも正確に割り出せる方法を用いる、画像の拡大率を上げて観測が可能になるよう周波数範囲を縮小する、回折格子への入射角を変更して分解幅上げるなど改良の余地が多いものと考えられる。

6 結論

参照用のミラーと試料金属からの反射光を干渉させるマイケルソンの干渉計とその干渉光を回折格子によって分光し周波数領域での干渉縞を検出する装置を、準備段階の模擬的な物とレーザー溶接の装置に隣接させる以後の測定に用いる物の 2 種類を作成し、それぞれ光路長差と干渉縞の間隔を関連づけた。今後の展望としては、加工資料の反射位置の短時間での変化に伴う干渉縞の輝度の低下に対応するため、高速度フレミングカメラの代替として、反射位置を等時間間隔で変化

させるポリゴンミラーと CCD カメラを組み合わせた観測装置を用いる予定である。

参考文献

- [1] 植田 憲一, 西岡 一, 米田 仁紀, 大橋 正健, 瀧岡 泉, サブヘルツ安定化レーザーを用いた超高性能光学素子計測技術に開発とその応用, 平成 8・9 年度科学研究費補助金 基礎研究 A(1) 研究成果報告書, pp. 143 (1998).
- [2] 松本 弘一, 高増 潔, 分光干渉法による絶対空間位置の計測技術, 2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集.
- [3] Seiji Katayama, Yousuke Kawahito, Masami Mizutani, Latest Progress in Performance and Understanding of Laser Welding, Laser Assisted Net shape Engineering 7 (LANE 2012), pp. 816 (2012).
- [4] 飯田 浩祐, ベッセルビームを用いた高アスペクト比ナノホール加工法の開発, 2017 年度卒業論文
- [5] 谷田貝豊彦, 応用光学 光計測入門, 丸善 (2005).
- [6] 霜田光一, レーザー物理入門, 岩波書店 (2018).
- [7] Amnon Yariv, 光エレクトロニクス 基礎編, 丸善 (2000).
- [8] 伊藤 敏雄, な～るほど! の波と光, 学術図書出版社 (2014).