

金属レーザー加工におけるその場計測手法の研究

情報理工学研究科 基盤理工学専攻
米田研究室 山本 拓磨

1 はじめに

金属のレーザー加工は、レーザー溶接・Additive Manufacturingをはじめとした様々な金属加工現場で用いられているが、今後より付加価値の高い加工方法や効率の高い加工法の探究が期待されている。しかし、レーザーと物質の加工領域に働く相互作用物理は、物質状態が固体からプラズマまで時事刻々と変化するため、その詳細なモデル化は困難を極めてい

る。近年、機械学習を用い、この相互作用物理の正確な情報をもはや必要としない予測モデルが注目されてきている。この中では時空間・周波数空間の多次元でのその場計測と加工評価結果を非常に多くのデータを集めることで、予測制御に繋げるものである。しかし、レーザー加工と言っても、その加工条件をある程度制御しないと、システムティックなデータにはならない。特に、精度の高い計測を行おうとすると、その観測点を空間の一点に固定する必要があるが、加工レーザーが連続的に照射されれば、加工試料の深部に向かって加工点は進行し、一定定点条件が失われてしまう。そこで、本研究ではそのような背景を受け、深部に向かう加工点を一定化させるその場観測システムの開発と評価をおこなった。また、その結果得られる、加工領域の発光分光スペクトルのデータから最適な解析手法として連続 wavelet 変換を用いた多次元解析手法によってレーザー加工状態を特徴づけすることを提案し、実際に

解析システムの開発・評価を行なった。

2 原理

2.1 連続 wavelet 変換

wavelet 変換とは、信号処理の分野で時間-周波数空間における対象関数の特徴を捉えるために開発された、関数解析・変換手法である。[1] 短時間フーリエ変換 (STFT) では、対象の関数形状に関係なく使用する窓関数によって時間分解能・周波数分解能が決まってしまう。三角基底関数を核関数として定義されるフーリエ変換に対して、wavelet 変換では種々の関数を核関数として定義できるため、時間と周波数の分解能をトレードオフの関係にせず

に信号全体を俯瞰的に解析ができ、不確定性原理 $\Delta x \Delta \omega \leq 1/2$ を満たす範囲で関数形状に最適な分解能を得ることができる。この性質を利用して、レーザー加工部から得られた時系列信号を wavelet 変換することで、取得したデータから周波数成分ごとの特徴量を抽出することができると考えた。wavelet 変換では、核関数を構成するための基本参照波を mother wavelet とよび $\psi(x)$ で表現する。

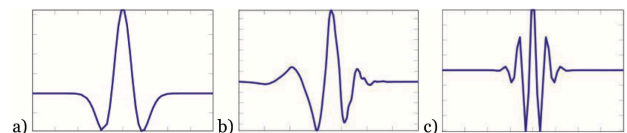


図 2.1: mother wavelet 関数の例 (a) Mexican hat. (b) Daubechies. (c) Morlet. [2].

また、wavelet 解析では、mother wavelet を

1. スケーリング：信号を時間軸方向に拡大・縮小するプロセス ($\psi(t/s)s > 0$)
2. シフト：信号を時間軸方向に平行移動するプロセス ($\phi(t - k)$)

することで被観測信号との関係性を調べる
ことである。

以上から、連続 wavelet 変換は

$$W(b, a) \equiv \sqrt{\frac{1}{|a|}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi_A\left(\frac{t-b}{a}\right)} \cdot f(t) dt \quad (2.1)$$

と表記される。なお、mother wavelet は振動的でなければいけないので、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2.2)$$

を満たす。

また本研究では、その場計測の振動パターンを解析した結果、図 2.1 に挙げられている Molet 関数が信号に対しての一致度が高く、有意なピークが観測できると考え、mother wavelet 関数として採択した。

3 その場計測のためのシステム開発

その場計測のシステムの開発要求は以下の通り。

- 常に座標が 0 となる方向に制御を行う
- 大きな成分の振動に対しては、少ない次定数で位置再現を行う
- 小さな成分の振動に対しては、レーザーの集光限界程度の空間分解能を踏まえて、20 μm 以内のその場再現性を維持した制御を続ける
- 30 分以上を目標とした長時間安定運用が可能

3.1 ハードウェア的手法

上記開発要求を満足する系として、図 3.1、図 3.2 の観測系を用意した。

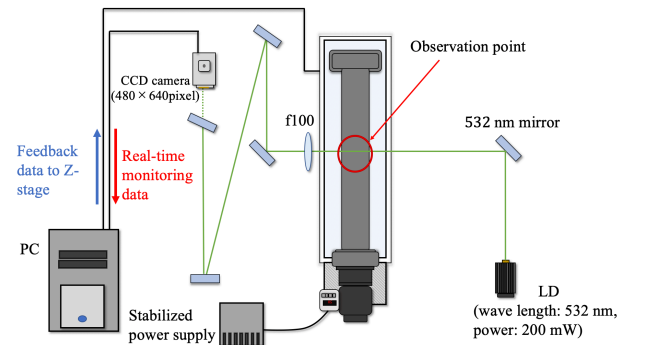


図 3.1: 観測系 (俯瞰図)

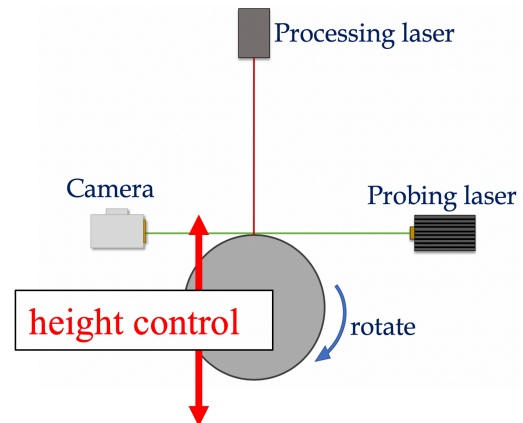


図 3.2: 観測系 (断面イメージ)

具体的には、試薄肉円筒形の試料に対して加工用レーザーとプローブレーザーを垂直に配置し、CCD カメラを用いて試料と空間の境界面を撮影することで、照射による膨張をフィードバックにより位置制御させる。数時間のレーザー加工で定点性を確保できるように、試料を螺旋状に加工することで照射表面積 1200 cm^2 を確保できるようにしている。実際の螺旋状加工の様子を図 3.3 に示す。

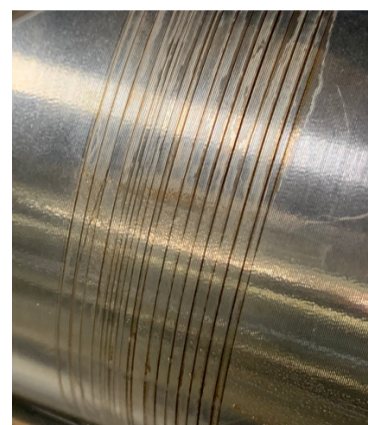


図 3.3: 螺旋状加工

この場合、試料の総重量は 4.2 kg 以上とな

り、この質量を $20 \mu\text{m}$ 程度の位置精度で固定する必要がある。

3.2 ソフトウェア的手法

開発要求に沿った制御を実現するために、CCD カメラを用いて取得されたフレームからターゲット断面と空間領域の境界面を高精度かつ高速に解析を行うプロセスを作成した。そして座標位置によって可変に制御の形式を変更できるようなシステムを高さ方向に制御するシステムと紐付けすることで、レーザー加工領域の連続的な発光分光スペクトルを取得できるシステムを開発した。

3.2.1 境界面判定アルゴリズム

CCD カメラによって取得したカラーイメージを2値化したのち、ターゲット断面と空間領域の境界面を判定する境界面抽出アルゴリズムを図 3.4 に示す。

Algorithm 1 境界面抽出アルゴリズム

```
Require: image
Ensure: position
1: for  $i = 0 \dots \text{image.length}$  do
2:    $\text{row} = \text{image}[i]$ 
3:   for  $j = 0 \dots \text{row.length}$  do
4:      $\text{cond\_row}[i] = \text{cond\_row}[i] + \text{row}[j]$ 
5:   end for
6: end for
7: for  $\text{position} = 0 \dots \text{cond\_row.length}$  do
8:   if  $\text{cond\_row}[\text{position}] == 0$  then
9:     break
10:  end if
11: end for
```

図 3.4: 境界面抽出アルゴリズム

解析の結果取得される画像の例を図 3.5 に示す。

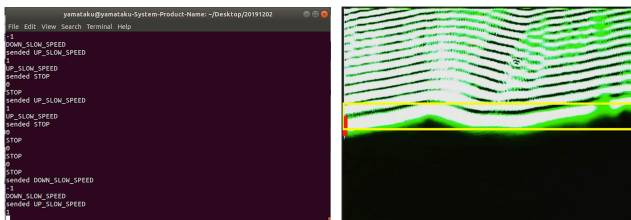


図 3.5: 画像解析実行例

黒色で表示されている領域が、ターゲットの断面であり緑色に発光している領域がプローブ光によって発色している空間領域である。なお、干渉縞が観測されているのは、以前の加工痕が残存している領域に対して観測を行ったため、加工痕が規則正しい溝で構成されており、グレーディングの役割を果たしているためであると考えられる。

また、赤い長方形の領域は畳み込みによって全空間の平均をとった場合の判定された境界面を示している。今回の例の場合、長方形上辺が 0 位置、下辺が境界面位置である。黄色の長方形領域は画像縦方向に $20 \mu\text{m}$ の目安として、常に画面中央に表示され、目視によってもその場観測制御の精度を観測できるように設計した。

3.2.2 高さ方向制御方式

図 3.6 に示すような検出される、座標位置によって可変に制御の形式を変更できるようなシステムを開発した。

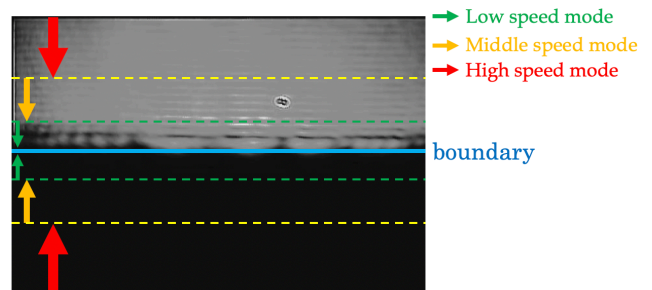


図 3.6: 高さ方向制御システムの概要

また具体的な制御手法について、本研究で使用した Z 軸ステージは最低速度・最高速度・加速度・S-curve パラメータの 4 つのパラメータが設定できることがプロトコルにより記述されており、そのパラメータを任意に変更することで、その場観測において、振動の大小により、可変に制御の切り替えを行うことでより高精度の制御を実現した。

また長時間安定動作について、先行研究では、システムを長時間運転させると送信されるデータ量に対して、データ受信側でバッファ

オーバーフローが発生してしまうことで、命令を受け付けなくなってしまふ現象が確認されていた。そこで、本研究では制御の精度を変更せず長時間安定動作を保障するために、1度制御信号が送信されると次の信号を受信するまでは同様の運動を行うという性質を利用して、連続した不必要な命令の送信回数を減らすことでバッファオーバーフローを防いだ。

4 高さ方向制御システムの評価

図 4.1 に円筒試料 1 回転分の制御結果と、1 周期の制御の中で最も振動成分が大きくなものが収束するまでの過程を示す。

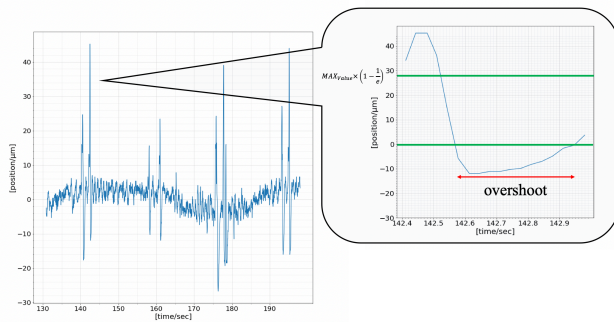


図 4.1: 制御結果 (1 周期)

この結果より、振動収束までの時定数は 0.06 秒、オーバーシュートを含めて完全に一つの振動成分が収束するまでの時間としても 0.47 秒という、ランダムな振動成分に対して高速応答をしていることがわかった。

また続いて振動制御の結果、目標値であった空間分解能 $20 \mu\text{m}$ に対して、本システムが時間的にどの程度制御できているかの評価を図 4.2 に示す。

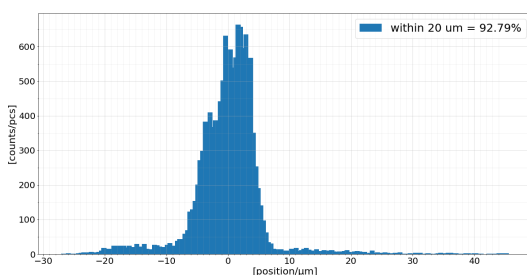


図 4.2: 制御によって収束する座標点

図 4.2 では、全体のデータ数に対して、目標値である $20 \mu\text{m}$ 以内の値を持つデータ点数を示したものである。この結果より、今回計測した 456 秒の制御時間の中で約 92.8% は目標値以下の制御が実現できていることがわかった。

5 その場計測により得られたデータの解析手法

5.1 位置分解分光計測

レーザー加工領域における発光特徴量抽出を行うため、位置分解分光計測を用いて可視光の分光イメージングの動画データを取得することを考えた。そのため、図 3.1 の構成に位置分解分光計測のための系を追加した構成を図 5.1 に示す。

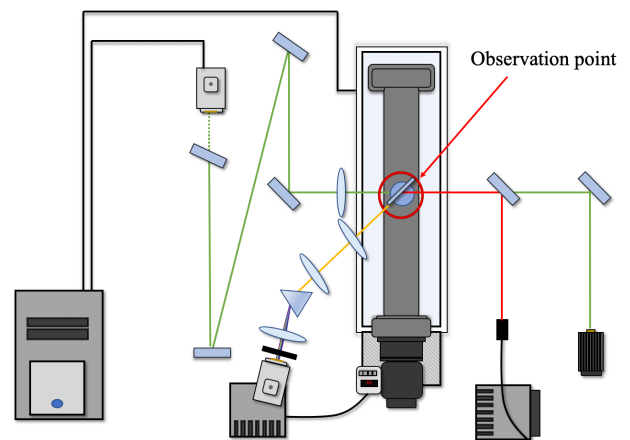


図 5.1: 位置分解分光計測系

5.2 連続 wavelet 変換を用いた解析システムの開発

5.1 章で構成した位置分解分光計測によって、分光イメージングの動画データが取得できる。この分光イメージングの動画データからは”時間”,”行方向 (位置成分)”,”列方向 (波長成分)”,” mother wavelet の周波数”,” Amplitude”の 5 次元のデータが出力される。”

取得したデータのあるフレームの例と対応する情報について図 5.2 に示す。

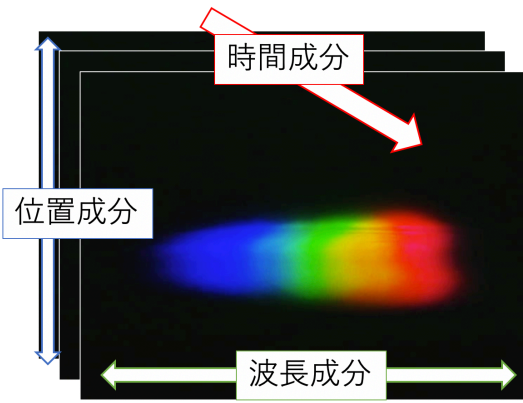


図 5.2: 分光イメージング

図 5.2 の動画データを入力として、自動的に連続 wavelet 変換を用いた解析からグラフ描画までを行うシステムを開発した。なお、この際 Amplitude の成分は実データとして必要であるので、時間・波長・空間・周波数について選択的に解析を行う必要がある。また、使用 RAM と解析のバランスを図るため、連続 wavelet 変換関数を通す前に、入力データに対して pooling 層を通すことでより高精度な解析を実現した。以上より、2D・3D グラフも併せて 12 通りの解析が同時に実行されるようシステム開発を行った。

5.3 解析システムの運用結果の例

以上の開発したシステムを用いて、ステンレス円筒試料のレーザー加工領域における解析結果の一例を示す。

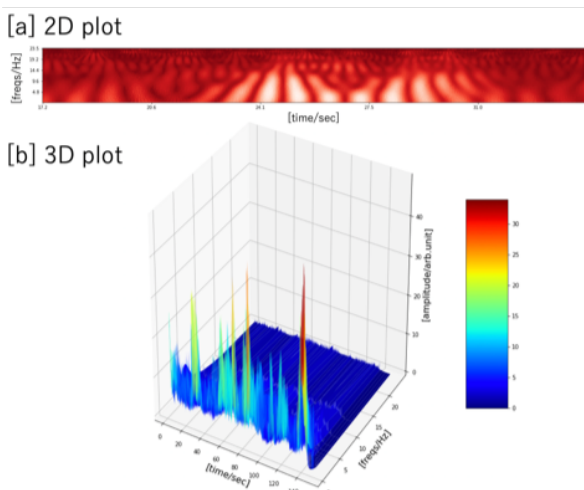


図 5.3: 時間一周波数解析

図 5.3[a] においては低周波領域に向かって

裾野が広がる山形の形状を周期的に有していることが確認できる。また高周波領域において、5 ms 程度のくし状の周期構造が見られる。後者について考察する。Wu ら [3] が観測していた CW レーザー加工時に発生する鱗状の加工痕に周期が一致していることから、上記の加工痕の出す特異な放射光が存在し、それが特徴付けられている可能性を示唆している。図 5.3[b] からは代表的なピークとして、約 20, 40 ~ 60, 70, 140 sec の位置に代表的なピークが観測された。そのため、この時間領域において、レーザー加工において、何か特徴的な現象が発生していることが見受けられた。

5.4 レーザーの出力変化に依存する特徴量抽出

5.3 章に示した通り、開発したシステムがレーザー加工領域の特徴量抽出に有意な情報を含んでいることが示唆された。そのため、続いて本研究ではレーザー出力に相関する特徴量の抽出を試みた。レーザーの具体的な出力としては約 2.9W, 3.3W, 7.7W, 10.3W の 4 パターンについて変化に対して相関する信号を抽出した。なお、各々の出力について集光強度は 185.9 W/cm^2 , 208.8 W/cm^2 , 488.3 W/cm^2 , 658.3 W/cm^2 であった。レーザー出力に依存する特徴量と見られる特徴の例について、周波数-空間解析に見受けられた。

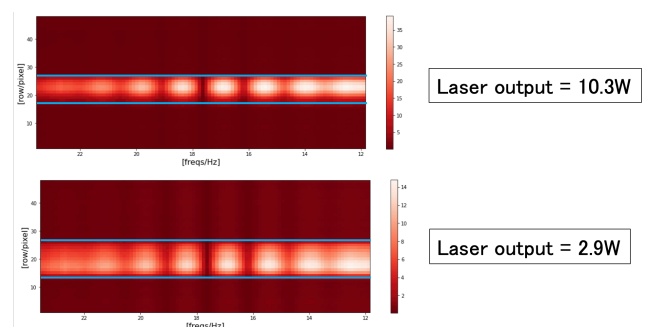


図 5.4: 周波数-空間解析

図 5.4 に示す通り、レーザーの出力の増加に伴って、空間領域の帯状の発光領域が狭まる傾向が観測された。そこで、図 5.5 に各レー

レーザー出力に対する帯領域の厚さの解析結果を示す。

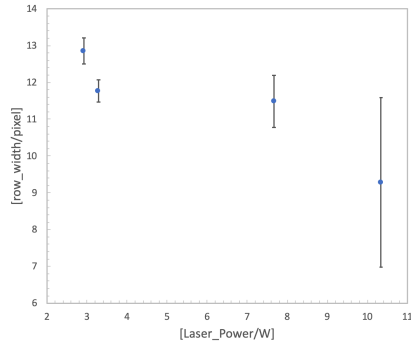


図 5.5: レーザー出力に対する発光領域の変化

図 5.5 から、本研究では取得したデータ点数が少なく、レーザー出力と発光領域幅の相関について具体的に表式化はできないが、実際にレーザー出力の増加に伴って明らかに発光領域帯の幅が狭まっていることがわかった。このことから、レーザー加工領域において、解析した周波数と位置分解分光計測の空間軸の間には依存関係があり、この場合の空間情報は深さ方向についてのみの情報であるはずなので、レーザーの溶け込み深さに起因していると考えられ、レーザー出力を連続的に解析することで、周波数と発光領域幅の情報から、レーザーの溶け込みの深さを同定できる可能性が示唆された。

6 まとめと展望

現在のレーザー加工領域の観測・制御においては、定常状態にない加工状況から得た放射光の生データを制御学習の入力とし、有意な出力を得ようとしているところにデータ量の観点と、入力データに定常性が担保できないことから、制御精度に問題がある。そのため、本研究ではレーザー加工中にある加工領域に焦点を合わせた場合に、定常性を担保することのできる制御システムの開発を行なった。また、レーザー加工領域の放射光のスペクトルデータを連続 wavelet 変換を用いて解析することで、時間・光強度・波長・空間・振動数に関する 5 次元情報によって、レーザー加工中に発生する特

微量の抽出を行なった。

実験結果としては、制御システムに対しては、10 kg 程度の物質が持つ最大 1 cm 程度の振幅成分を最大 92.79% の間 20 μm 以内に押さえ込むことに成功した。また、リアルタイム制御の追いつかない瞬間的に振動する成分に関しても、時定数 0.06 秒で振動が収束する様子が確認された。

wavelet 変換を用いた解析については、発光イメージングの動画データから、特徴量の一例を提示し、レーザーパラメータの変化による特徴量抽出可能性を示唆した。

今後の展望としては、純粋な分光情報のみを抽出するため、hump 関数を用いてより特徴量の抽出に有利な入力データを作成することや、より高精度な制御、実験結果を重ねることによってレーザー加工領域に対する特徴量データベースの作成が求められる。

参考文献

- [1] Jaffard, Stéphane and Meyer, Yves and Ryan, Robert D, "Wavelets: tools for science and technology", SIAM, 2001
- [2] Selim, Hossam and Moctezuma, Fernando Piñal and Prieto, Miguel Delgado and Trull, José Francisco and Martínez, Luis Romeral and Cojocarú, Crina, "Wavelet transform applied to internal defect detection by means of laser ultrasound", In *Wavelet Transform and Complexity*, IntechOpen, 2019
- [3] Q. Wu and R.S. Xiao and J.L. Zou and J.J. Xu, "Weld formation mechanism during fiber laser welding of aluminum alloys with focus rotation and vertical oscillation", *Journal of Manufacturing Processes*, **36**, 149 - 154, 2018