CO₂レーザ切断条件自動設定システムの開発*小西 康夫^{*1}, 喜多 重昭^{*1}
石垣 博行^{*1}, 長谷川 素由^{*1}Development of Automatic Determination System for Optimum
CO₂ Laser Cutting ConditionYasuo KONISHI, Shigeaki KITA,
Hiroyuki ISHIGAKI and Motoyoshi HASEGAWA

Developing an automatic system for determination of the optimum laser cutting condition is a key technology to realize wide use of various materials. In this study, practical methods which use acoustic emission (AE) signals are proposed to monitor the cutting quality of the workpiece in the CO₂ laser cutting process. Both the fractal dimension of the visualized figure of the AE signal and the correlation coefficient of the regression line are used instead of the power spectrum in the proposed signal processing method. These indexes are efficient in classifying the cutting state of the workpiece by the quality. By using these results, a system for automatic determination of the optimum cutting condition can be developed after several cutting trials.

Key Words: Laser Cutting, Acoustic Emission, Monitoring, Fractal Dimension, Nontraditional Machining

1. 結 言

レーザ加工は、機械加工が困難な高硬度材料の加工など幅広い分野での利用が期待されている。しかし、加工の一般化された条件が未だ決っておらず、材料やその形状が変化した場合には、試行錯誤を繰返し加工条件を決定しなければならない。また、長期使用に伴いレンズが劣化し、レーザパワーやモードパターンなどが変化し、常に最適な加工条件で加工するには作業者が注意し加工条件を補正しなければならない。これらの問題を克服するために、レーザ加工の監視やオンライン制御に関する研究、例えば、加工音⁽¹⁾や反射光⁽²⁾を利用したものなどが既に報告されているものの、実用段階には至っていない。

このような状況に対し、本研究は、オフラインの監視であるが、信頼性の高い実用可能なレーザ切断条件の自動設定システムの開発を試みた。センサは、加工状態の監視に広く有効性が確認されているアコースティックエミッション（以下AEと略す）センサを、レーザ切断用ヘッドに直接取り付け、

センサの信号処理は、従来簡単な場合は、信号の静的な成分としてレベルを調べる程度であり、詳しく検討する場合には動的な成分としてパワースペクトルの利用が一般的である⁽³⁾。パワースペクトルは人間にとって容易に特徴を抽出し易いが、情報量が多すぎ、コンピュータでパターン認識を行うには不向きであり、何らかの別の信号処理法が望まれている。

そこで本研究は、まず第1にコンピュータでパターン認識し易い静的な特徴量として、AE信号の突発的な影響を受けない確率密度関数のモードAE_{mod}⁽⁴⁾を用いた。また、第2の特徴量としてAE信号の動的な評価として、AE信号を視覚化しそのフラクタル次元⁽⁵⁾を利用することにより、バーニング切断、正常切断、ガウシング切断、未切断、穴あけ加工終了の判定が可能なことを実証する。最後にこの知見により、何回かの試行切断の後に、自動的に切断加工条件を決定するシステムを提案した。

2. AE信号波形の検出

図1は、実験装置の概略を示している。実験装置は、三菱電機社製CO₂レーザ加工機(MI-806T-3061)、NF社製AEセンサ、プリアンプ、ディスクリミネータ、エレクトロニカ社製波形記憶装置、EPSON社

* 原稿受付 平成6年7月11日。

^{*1} 正員、姫路工業大学 (〒671-22 姫路市書写 2167)。

図1 実験装置の概要

表1 実験条件

	Cutting	Piercing
Assist gas	Oxygen (50KPa)	Oxygen (0.2MPa)
Power of laser	250 W (250Hz of pulse wave)	600 W (CW)
Duty factor	0.2	
Sampling interval	0.5 ms	0.5 ms
One data set	128 ms	512 ms
Cutting speed		100 to 4500 mm/min
Workpiece	SS41, 3mm in thickness	SS41, 3mm in thickness

製コンピュータにより構成されている。レーザ加工中に発生するAE信号は、レーザ切断加工用ヘッドに直接取り付けられたAEセンサにより電圧信号に変換され、プリアンプで増幅した。増幅されたAE信号は500 μ sのサンプリング間隔でA/D変換され、フィルタを通さず波形記憶装置に記録した後、コンピュータに入力し処理を行った。

実験は、同一の試験片(ss41,3mm厚)を用いて、ピアシングと切断について表1に示す条件で行った。切断実験は、酸素アシストガス(200kPa)を使用し、600Wの連続波で試験片送りを100mm/minから4500mm/minまで変化させて行い、512ms(1024サンプリング点)を1データセットとして処理した。また、ピアシング実験は、酸素アシストガス(50kPa)を使用し、250Wでデューティ20%のパルス波形で行い、128ms(256サンプリング点)を1データセットとして処理した。

3. AE信号の特徴抽出

3・1 AE信号の静的な特徴抽出 図2は、試

験片送り速度1500mm/minの正常切断時のAE信号の一例である。正常切断時はAE信号の振幅が小さくかつ安定している。図3は、試験片送り速度の遅いバーニングが発生した場合のAE信号の一例である。バーニングが発生すると、AE信号のレベルが低下し大きなうねりが確認できる。図4、5は、それぞれ試験片送り速度の速いガウシング切断および未切断時のAE信号の一例である。ガウシングや未切断時には、AE信号のレベルが上昇し振幅が大きくなっていることが確認できる。

図2 正常切断時のAE信号

図3 バーニング時のAE信号

図4 ガウシング時のAE信号

図5 未切断時のAE信号

このように人間は、AE信号の生波形のみで簡単に正常切断と異常な切断状態を認識できるが、コンピュータにこのようなパターン認識を行わせるには、AE信号の情報を圧縮しなければならない。ここでは、コンピュータでパターン認識しやすい静的な特徴量として、突発的な雑音の影響を受けないAE信号の確率密度関数のモード (AE_{mod}) を用いた。図6は、試験片送り速度に対する AE_{mod} の変化を示している。図中の1つのプロットは、40個 (約20秒間) のデータセットの平均値を表している。これより、試験片送りが増加すると AE_{mod} も増加することが確認できる。この結果、しきい値を設ければ正常切断と異常切断の分離が可能である。しかし、この情報だけではAEセンサの取り付け圧力などによりAE信号のレベルが変化するため、信頼性のある推定は困難である。

3・2 AE信号の動的な特徴抽出 全ての試験片送り速度で得られたAE信号の最高電圧 (ここでは10V) で除して無次元化し、そのデータを $\{X_n\}$ とする。次に、平面上の直行座標の横軸に X_n を、縦軸に X_{n+1} の値を順次プロットする。本研究では、このようにして描くことをAE信号の視覚化と定義する。これはカオスのアトラクタを描く方法であるが、本実験

図6 試験片送りと AE_{mod} の関係

で得られたAE信号にはカオス性は見られなかった。図7は、正常切断時のAE信号の1サンプルデータを視覚化した一例である。これより、AE信号の視覚図はほぼ円形に近く1点にまとまって描かれている。図8は、試験片送りの遅いバーニングが発生した場合のAE信号の視覚図である。プロットした点は正常切断時より左下の方に細長く分布し、明らかに正常切断時とは異なっている。図9、10は、それぞれ試験片送りの速いガウシング切断および未切断時のAE信号の視覚図である。これより、ガウシング切断と未切断の場合は、プロットした点が正常切断時より右上方に細長く分布しており、やはり明確に異なった特徴を描くことが確認できる。

このように、平面上に描かれた図形の特徴を圧縮し抽出する1つの方法は、図形の複雑さと関係があるフラクタル次元の利用である。フラクタル次元 k とは、

図7 正常切断時のAE信号の視覚図

図8 バーニング時のAE信号の視覚図

図9 ガウシング切断時のAE信号の視覚図

図10 未切断時のAE信号の視覚図

図形が1辺の長さ d の正方形 $N(d)$ 個で覆われたとき、 d を変化させたときに $\log N(d)$ と $\log d$ の間に傾き $-k$ の直線関係があれば、 k を図形のフラクタル次元と呼んでいる。ここでは、この理論を利用するが、得られたAE信号の視覚図が必ずしもフラクタル性をもつとはかぎらないので、回帰直線の傾き k とその相関係数 r の2つを、AE信号の動的な特徴を評価する指数として利用した。

4. レーザ加工状態の監視と切断条件設定システムの開発

図11は、前章で定義した回帰直線の相関係数 r の約20秒間(40個のデータセット)の平均値と試験片送りの関係をプロットしたものである。図より、正常切断領域では直線の相関が最もわるく自己相似性が弱いことがわかる。また、異常な切断状態では直線の相関が -1 に近付いており、自己相似性が強くフラク

タルであることが確認できる。図12に、その時のフラクタル次元 k を示す。これより、異常切断時にはフラクタル次元 k が大きな値をとり、正常切断時にはフラクタル次元 k は最小値をとることがわかる。以上の結果から、相関係数 r とフラクタル次元 k を利用することにより、AE信号のレベルに依存せず正常な切断状態と異常な切断状態を確実に分類することが可能となる。

ここでは、さらにこれらの情報が他の加工状態の監視に有効か否かを、穴あけ行程を例にとり検討する。図13は、穴あけ行程中のAE信号の波形の一例であ

図11 試験片送りと相関係数の関係

図12 試験片送りとフラクタル次元の関係

図13 穴あけ行程中のAE信号の一例

る。加工後約0.5秒後にAE信号のレベルが大きく低下し、振幅も小さくなっていることから、この時点で穴が貫通していることがわかる。表2は、先に利用した3つの特徴量、すなわち、 AE_{mod} 、相関係数 r およびフラクタル次元 k について、穴あけ加工終了前後のそれぞれ6個の平均を比較したものである。これよ

表2 穴あけ加工前後の特徴量の比較

	Before piercing	After piercing
AE_{mod}	5.21 (v)	2.00 (V)
Fractal dimension	1.27	1.16
Correlation coefficient	-0.94	-0.43

図14 レーザ加工条件自動設定の手順

り、穴あけ加工中は AE_{mod} が大きな値を示し、かつ相関係数 r が-1に近くフラクタル性が強く、フラクタル次元も大きな値を示す。しかし、貫通穴が生じた後はフラクタル性が弱く、フラクタル次元も小さいことがわかる。以上の結果から、穴あけ加工終了の監視も、 AE_{mod} 、AE信号の視覚図のフラクタル次元 k 、さらに相関係数 r を用いることにより可能となる。

以上の結果を総合することにより、図14に示すアルゴリズムを利用することにより、AE信号のレベルに依存することなく、何回かの試行切断の後にレーザー加工条件を自動設定することができる。

5. 結 言

本研究は、レーザー加工中のAE信号を利用することにより、加工状態を監視する新しいアルゴリズムを提案した。得られた結果を以下に要約する。

(1) パワースペクトルに変わる新しい特徴抽出量として、AE信号を視覚化し、その図のフラクタル次元と回帰直線の相関係数を利用した。

(2) 正常切断時や穴あけ加工終了後のAE信号の視覚図は、自己相似性（フラクタル性）が弱いことを示した。

(3) パーニング切断、ガウシング切断、未切断、穴あけ加工時のAE信号の視覚図は、自己相似性（フラクタル性）が強いことを示した。

(4) この結果、AE信号のレベルに依存せず、パーニング切断、正常切断、ガウシング切断、未切断、穴あけ加工終了時点の判定が可能となり、信頼性のある加工条件設定システムが構成できる。

最後に本研究の遂行にあたり、本学部生、藤沢彰君の協力を得た、ここに謝意を表する。

文 献

- (1) 宮崎・田中, 精密工学会誌, 55-8(1989), 1421.
- (2) F. O. Olsen, ほか2名, Proc. of LAMP (1992), 405.
- (3) 例えば, 松林・ほか3名, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1993), 533.
- (4) 小島・ほか2名, 機論, 52-474, C(1986), 799.
- (5) B. Mandelbrot, The Fractal Geometry of Nature, (1983), W. H. Freeman and Company, NEW YORK.