

# レーザー溶接のための差分処理を用いた光切断トラッキング

高塚 信行<sup>\*、\*\*\*</sup>, 部谷 学<sup>\*\*</sup>, 沖原 伸一朗<sup>\*\*\*</sup>  
鈴木 重啓<sup>\*</sup>, 北原 正<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>エンシュウ株式会社 (〒432-8522 静岡県浜松市南区高塚町 4888)

<sup>\*\*</sup>大阪産業大学 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)

<sup>\*\*\*</sup>光産業創成大学院大学 (〒431-1202 静岡県浜松市西区呉松町 1955-1)

Seam Tracking with Light Stripe Triangulation Using a Difference Processing for Laser Welding

TAKATSUKA Nobuyuki, HEYA Manabu, OKIHARA Shin-ichiro, SUZUKI Shigehiro, KITAHARA Tadashi

(Received November 4, 2011)

A seam tracking method using light stripe triangulation combined with image subtraction for laser welding of tailor-welded blanks is proposed. It is important to bring a light stripe close to the laser welding position in order to perform seam welding in a complicated form. However, bright welding plasma (plume) prevents detecting the tracking stripe line beam clearly. An optical fiber with photodiode at the end has been setup to a laser diode welding machine experimentally. By intensity modulating the tracking stripe and taking subtraction between the photodiode signals which adjoin each other mutually in time, a clear tracking signal is obtained from the signal with the bright plume effect. Therefore, we have concluded that much more complicated-shaped tracking may be realized with an image tracking system using a CCD camera and image subtraction processing.

**Key words** : laser welding, seam tracking, light stripe triangulation, plume, subtraction processing

## 1. 緒 言

レーザー発振器の高出力化, 高ビーム品質化により, レーザ溶接はアーク溶接と比べ高速, 高品質な溶接が可能になった. ビーム径を小さく絞ることでレーザー溶接では, 熱歪みが小さく溶接ビードが細い溶接ができるため, テーラードブランク溶接をはじめとした様々な分野の溶接に利用されている<sup>1)</sup>. しかし, ビーム径が小さいためビーム照射位置に高い精度が要求されており, 突合せ溶接では突合せ位置からの横ずれやビーム焦点位置のずれがわずかであっても溶接不良につながることもある. そのため, レーザ加工機には高い位置精度が要求されている<sup>2)</sup>. また, テーラードブランク溶接など加工時間の短縮が要求される加工には, 溶接位置を正確に自動補正するためにトラッキングシステムが導入されはじめています.

レーザー溶接時に生じる強い発光を伴うプラズマ(ブルーム)によって妨害されるために, 従来, 複雑形状の溶接線トラッキングは困難であった. 本研究では画像差分処理によりブルーム画像を除去する光切断トラッキングを提案し, 基礎実験を行って複雑形状トラッキングが可能であることを示した.

溶接線の位置を特定する手法として, 光切断法がよく使われている<sup>3),4)</sup>. 光切断法は, ワーク上に線状の光線(ライン光)を投影するライン光投影装置と, その光軸から適当な角度  $\varphi$  ずらした光軸上にライン光を観察するカメラを

配置し, 得られた画像から演算によりライン光照射位置の表面形状を非接触で計測する手法である. 計測位置を移動させながら計測することにより, ワーク表面の3次元形状を計測できる. 溶接箇所には開先加工や板厚の違いによる溝または段差があり, 正確な溶接線の位置を特定できる. このような光切断トラッキングシステムに溶接用レーザー装置を組み合わせればトラッキング可能なレーザー溶接システムとなる. その一例を **Fig. 1** に示した.

光切断法を溶接のトラッキングに用いる場合は, 溶接用レーザーの散乱光とブルームからの光の影響を十分に抑えて正確な表面形状を計測する必要がある. 従来のシステムではライン光の波長のみを透過させるバンドパスフィルタをカメラレンズの前に取り付けることにより, イメージセンサに入射するブルームからの光などの外乱光を抑えている<sup>4)</sup>.

バンドパスフィルタ単体でのブルームの光除去では, 除去率が必ずしも十分ではないために, ブルームが表面形状計測用カメラの視野に入らないように配慮して, 溶接位置とライン光照射位置との間隔  $d$  をある程度広げる必要がある. しかし, 曲率半径が小さい溶接線を含む複雑形状のワークにトラッキングシステムを適用していくためには, 間隔  $d$  を短くする必要があり, カメラの視野内にブルームが入ってしまう. そこで, その光の影響を更に効率よく除去することが必要である.

本論文では, 計測用カメラ視野内に強力なブルームの光が入ってしまう場合でも, レーザ溶接に光切断法によるト

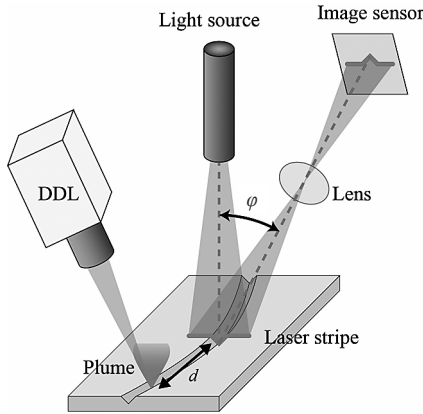


Fig. 1 Principle of the tracking system using light stripe triangulation

ラッキングができるようにする方法として、画像差分処理を併用することを考案した。また、光ファイバと光検出器との組み合わせ(イメージセンサ1画素のモデル)を用いて基礎実験を行い、その可能性を検証した。

2. 原理

Fig. 1 に示す光切断トラッキングシステムでのイメージセンサには、ライン光以外に直接照射型半導体レーザー(DDL)<sup>5),6)</sup>によるプルームの光と、他の非変調外乱光が入ってしまう。これらの影響は以下の考えにより除去することが可能である。DDL 光は連続発振(CW)で強度変化が少ないため、発生するプルームの光は時間的強度変化も比較的少ない。従って、イメージセンサに反映されるプルーム画像の強度変化も同様に少ないと考えられる。時間的に断続させたライン光を光切断計測のモニター光としてワークに照射し、その画像計測を行う。ライン光が写った画像と、時間的に隣り合ったライン光の写っていない画像の両方にはほとんど同じ強度のプルーム画像が写っている。前者の画像から後者を差し引けば、プルームとはほとんど無関係の画像が得られると考えられる。以上の内容は、数式を用いて説明すると次のようになる。

ライン光を周波数  $f_0$  で点滅させ、イメージセンサではライン光と位相を合わせた  $2f_0$  のフレームレートで画像を取得する。Fig. 2 はワーク上で散乱したライン光が入射し

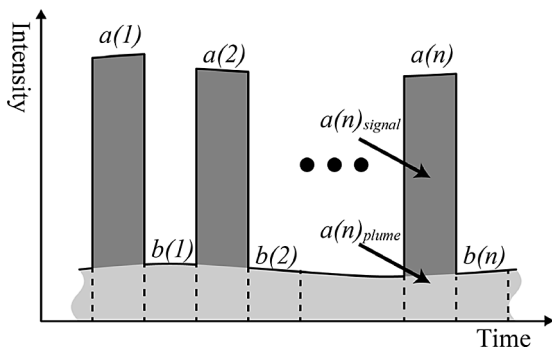


Fig. 2 Intensity of light which enters into 1 pixel of an image sensor

ているイメージセンサ上1画素から得られた信号の処理を表したものである。イメージセンサは  $2f_0$  のフレームレートで画像を取得しているため、画素からはライン光が点灯時のフレーム(Frame A)にあたる信号  $a(n)$  と、消灯時のフレーム(Frame B)にあたる信号  $b(n)$  が交互に得られ、時系列的に  $a(1), b(1), a(2), b(2), \dots, a(n), b(n)$  なる信号が得られる。Frame A にはライン光による信号  $a(n)_{\text{signal}}$  と、プルームからの光による信号  $a(n)_{\text{plume}}$  が重畳しているが、除去によって得たい信号  $I(n)$  は  $a(n)_{\text{signal}}$  に相当する部分のみである。プルームからの光を除去した後のライン光の信号は

$$I(n) = a(n) - a(n)_{\text{plume}} \quad (1)$$

の演算を行うことで求められるが、同一フレーム内の  $a(n)_{\text{plume}}$  を  $a(n)$  と分離して単体で得ることは困難である。そこで、プルームからの光の時間強度変化に比べてフレーム間隔を十分に小さくするように  $f_0$  を大きくすれば、 $a(n)_{\text{plume}} \doteq b(n)$  となるので

$$I(n) = a(n) - b(n) \quad (2)$$

の演算を行えば、式(1)と同等の結果が期待できる。

Fig. 3 に我々が想定するトラッキングシステムの概要を示す。光学機器の配置は光切断法を利用した従来のトラッキングシステムと同一であるが、これにライン光の点滅および画像の差分処理を行うための回路が付加されている。また、ライン光の投影機には周波数  $f_0$  で点滅させるためのパルス発振器が接続されており、カメラにはライン光の点滅と同期してフレームを取得するためのパルス発振器と取得画像に差分処理を行うための演算回路とメモリが接続されている。さらに、パルス発振器はライン光の点滅と同期してカメラが撮像できるように  $f_0, 2f_0$  の同期信号を出力している。

Fig. 3 に示す系によってプルームからの光の影響を受け

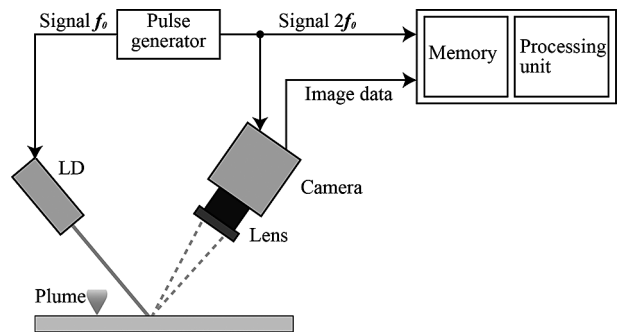


Fig. 3 Block diagram of the image signal processing system

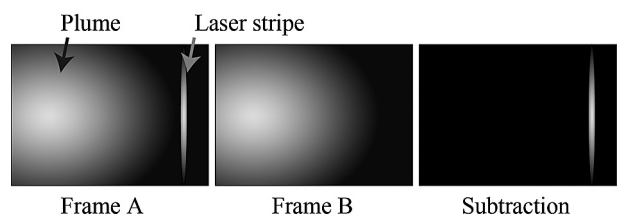


Fig. 4 A schematic example of the image processing

ない画像が得られる様子を Fig. 4 に模式的に示した. 周波数  $2f_0$  でメモリに入れられる  $n$  番目の画像が Frame A ( $n$ ) で, そこから,  $1/(2f_0)$  遅れてメモリに入る画像が Frame B ( $n$ ) であり, 前者の画像から後者を差し引いた画像として, 図のようなライン光の画像が得られる.

### 3. 実験

#### 3.1 プルームの分光計測

非常に強い溶接用レーザー光とプルームからの光によりイメージセンサあるいは光検出器が飽和しないようにするために光学フィルタを使う必要がある. フィルタの種類を決めるためにレーザー溶接時に発生するプルームの光を計測した.

実験は Table 1 に示す条件でワークを移動させながらメルトランを行い, 発生したプルームを分光計測した. 溶接用レーザーは波長 808 nm の DDL (浜松ホトニクス製, Model LA0394D, 最大出力 500 W, 集光スポット形状  $1.4\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$  ( $1/e^2$ ) の矩形) を使用し, ワークは板厚 1.2 mm の冷間圧延鋼板 (SPCC) を使用した. アシストガスは使用していない. 集光スポットのパワー密度はレーザー出力とスポットサイズより  $5.4 \times 10^4\text{ W/cm}^2$  であった. Fig. 5 にこの時にできたビードを示す.

Fig. 6 に示すように, レンズで集光してファイバに通したプルームからの光を 830 nm 長波長側シャープカット

Table 1 Welding conditions

|                        |                 |                     |
|------------------------|-----------------|---------------------|
| Workpiece              | Size (mm)       | 90×45×1.2           |
|                        | Material        | SPCC                |
| DDL                    | Power (W)       | 300                 |
|                        | Wavelength (nm) | 808                 |
|                        | Spot size (mm)  | 1.4×0.4 ( $1/e^2$ ) |
| Welding speed (mm/min) |                 | 952                 |

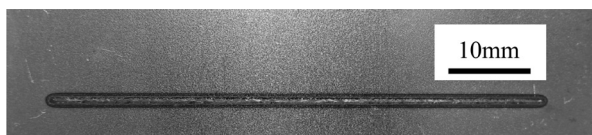


Fig. 5 A bead on a plate fabricated by a 300-W laser diode

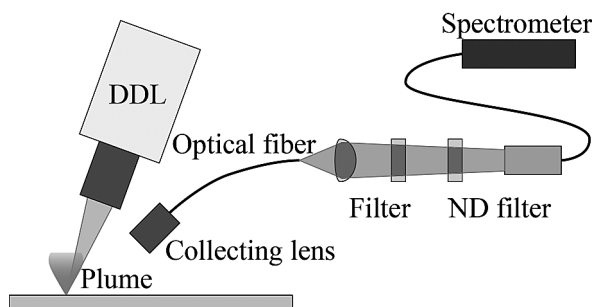


Fig. 6 Schematic diagram for spectrum measurement

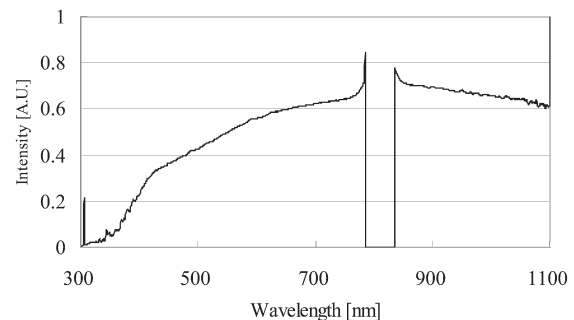


Fig. 7 A compound spectrum consisting from two spectra using high-pass and low-pass optical filter respectively

フィルタと ND フィルタを通した後, ファイバ入力分光器により分光計測した. 同様に, 785 nm 短波長側シャープカットフィルタと ND フィルタとを用いて計測した. このようにして得たスペクトルを同一図上に載せたものが Fig. 7 である. 波長 785 nm と 830 nm 近傍のピークは中心波長 808 nm 溶接用レーザー光のスペクトル端の一部によるものであり, プルームによるものではない. Fig. 7 は, プルームのスペクトルが 400 nm から 1100 nm を超える広い範囲にわたる連続した分布をしていて, ライン光用に狭帯域バンドパスフィルタを用いることにより, 808 nm を除くプルームからの多くの光を除去できることを示している. ちなみに, Fig. 7 のスペクトル分布は熱伝導形溶接によるプルームの特徴<sup>7)</sup>と合致していることから, このメルトランは熱伝導形によるものと考えられる.

#### 3.2 電気的差分処理によるプルーム発光の影響除去

##### 3.2.1 1画素相当光学系による計測と電気信号処理

原理の項で提案した電気的差分処理を用いたプルームによる光の影響除去の可能性について実験的に調べた. Fig. 8 にその実験系を示す. この実験ではイメージセンサは使用せず, イメージセンサ 1 画素分に相当するものとして, レンズの結像位置に光ファイバ端面を置き, 他端に光検出器を接続したものをを用いた.

ライン光の点滅周波数  $f_0$  を決めるにあたっては将来, 3 次元計測を行うためにイメージセンサを使用することを考え, 一般的な工業用高速度カメラで実現可能なフレームレート 400 fps を仮定して,  $f_0$  を 200 Hz とした.

溶接として, これまでと同様に Table 1 の条件で DDL によるメルトランを行った. 光切断計測のために, 可視光のレーザーダイオード (LD) を光源とするライン光投影装置 (キコー技研製, Model MLXK-D13-660-40, 波長 660 nm) を用いた. ライン光が溶接位置の 10 mm 手前に位置し, 線幅が 2 mm となるようにその向きと位置を調整した. この時の, ワーク上におけるライン光の照度は 924 lx であった. 受光部はバンドパスフィルタと焦点距離 50 mm のカメラレンズとからなる集光系と, コア径 0.8 mm の光ファイバと, 光検出器 (NEW FOCUS 製, Model 2001, 受光素子: シリコンフォトダイオード) とで構成されている. 光ファイバにはワーク上直径 1.7 mm の領域からの光が入射する. レンズによる結像位置にはイメージセンサの代わりとして

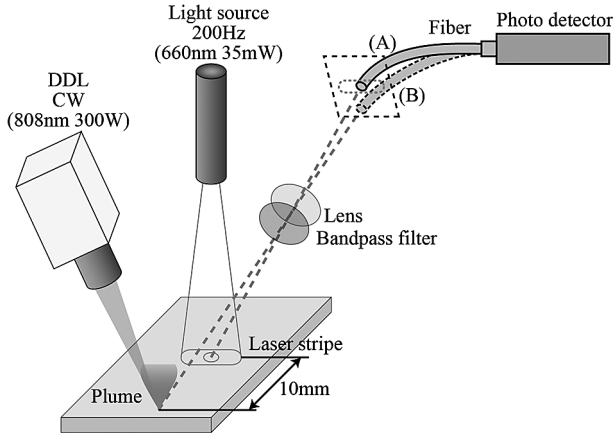


Fig. 8 Schematic diagram for observation of optical intensity

光ファイバ先端を置き、結像位置の異なる場所について計測するために光ファイバ入射端を移動させてその都度計測した。使用した光検出器は直流から 100 kHz まで一定の周波数応答を持っているため 200 Hz 変調の信号を計測できた。バンドパスフィルタとして、中心波長 660 nm (半値幅 10 nm) の狭帯域バンドパスフィルタを用いてプルームの光と溶接用レーザー光とが光検出器にできるだけ入らないようにした。光検出器の出力信号はオシロスコープで記録し、以下に示すような計算処理を行った。

Fig. 9 はライン光による信号  $g(t)$  とプルームからの光による信号  $h(t)$  が含まれた入力信号  $f(t)$  を例に、その処理内容を模式的に示したものである。処理は A から D の順に行う。最初に処理 A で波形を取り込む。そして、処理 B で各フレームの信号を 1 フレームの時間  $[1/(2f_0)]$  内で平均化し、ライン光が点灯しているフレームの信号  $a(n)$  と消灯しているフレームの信号  $b(n)$  を求める。処理 C では  $a(n)$  から  $b(n)$  を減算する。最後に処理 D で減算結果を演算に用いた 2 フレーム分の結果として出力する。

これら一連の処理はイメージセンサの 1 画素における動作と、その信号を受けて差分処理を行う演算回路の動作を模している。実際のイメージセンサでは 1 フレームの時間に画素内のフォトダイオードで発生した電荷をキャパシタに蓄積し、AD 変換によって画素信号として出力する。この動作に相当する内容を処理 A、処理 B で行っている。処理 C、処理 D は演算回路での処理であり、処理 C で差分処理を行っている。

実験はプルームからの光が入射する画素と、ライン光が入射する画素を想定して、メルトランを 2 回行った。最初に、Fig. 8 のファイバ端面位置 (A) に示すようにライン光結像位置にファイバ端面を置いて光計測した。これにより得られた電気信号に上記の処理を行った。次に、Fig. 8 のファイバ端面位置 (B) に示すように光強度が最も強いプルーム画像の位置に光ファイバの端面を置いて計測し同様の信号処理を行った。

3.2.2 実験結果

Fig. 8 (A) の位置にファイバ端面を置いてライン光結像の中心位置での光を計測した結果を Fig. 10 中に実線で示

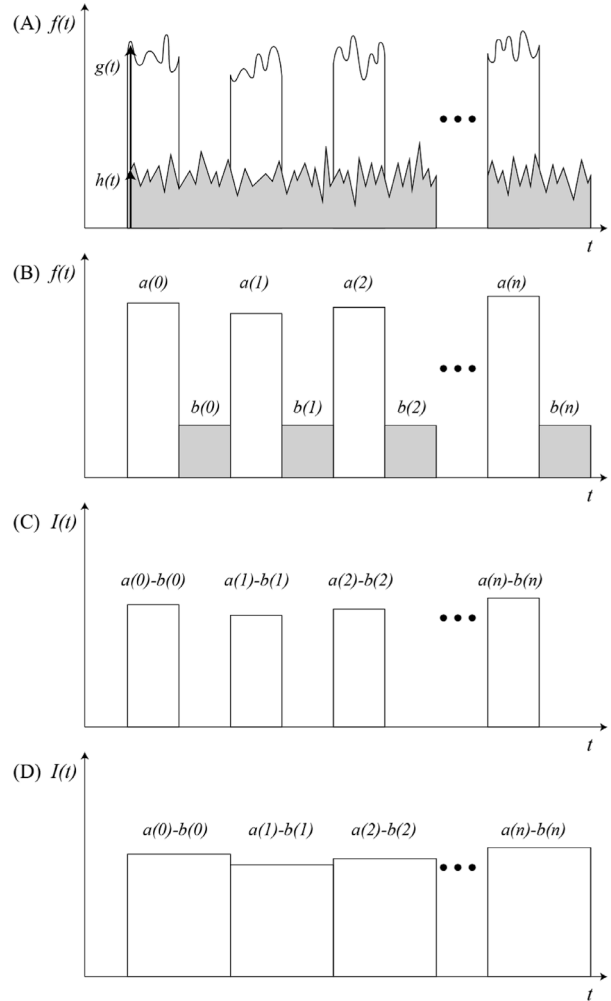


Fig. 9 Processing equivalent to image sensors and differential operation

す。ライン光は 200 Hz で点滅しているため 2.5 ms 間隔で信号が大きく変化している。

LD がオフとなっている間、つまり図の谷の部分にはバンドパスフィルタを透過したプルームからの光信号が見られるはずであるが、電気ノイズと思われる信号は見られるものの値がほぼゼロとなっておりそれらしき信号は検出されていない。このことから、バンドパスフィルタにより、プルームからの光と溶接用レーザー光が除去されていることが分かる。Fig. 10 中の破線は受光した信号に Fig. 9 で示した処理を行ったものである。2 フレーム分の信号で差分処理を行うため、5 ms ごとに値が変わる階段状のグラフとなった。破線で示した処理後の信号は、受光信号(実線)よりも約 6% 低い値となった。これは LD オフ時の信号だけではなく、LD の立ち上がりおよび立ち下りの特性によるものである。LD の立ち上がりに遅延がある場合、差分処理を行う前の平均化の際、信号値が低下し処理結果が低い値となる。同様に、立ち下り特性に遅延がある場合は、遅れた分のライン光が  $b(n)$  の一部として処理されてしまうため、処理結果が低下する。Fig. 10 の実線に示した光検出器信号に関する解析から、本実験での信号低下への影

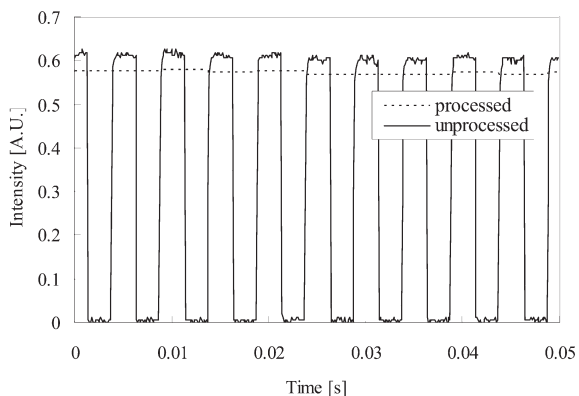


Fig. 10 Signal of the optical sensor. The focus of an observation system was set in the laser stripe

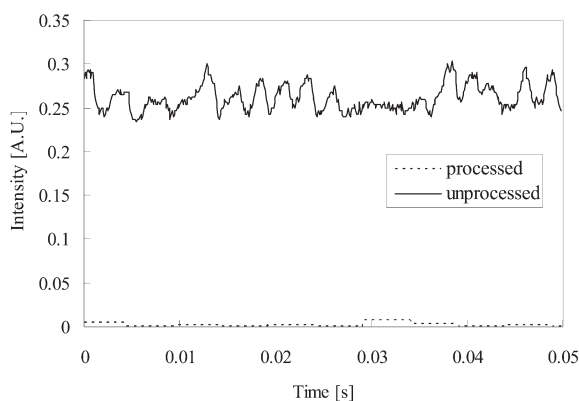


Fig. 11 Signal of the optical sensor. The focus of an observation system was set in the welding position

響の割合は、立ち上がり、立ち下がり、および LD オフ時の信号成分によるものがそれぞれおよそ 8 : 1 : 1 であった。このことから、差分処理後の信号低下は主に LD の立ち上がりの遅延によるものと考えられる。

Fig. 10 の破線で示す処理結果は、差分処理によってライン光による信号強度が連続した信号に変えられたこと以外には、強度の大幅な減少や変調といった影響をほとんど受けていないことを示している。破線のわずかな強度変化は、ワーク表面の形状が場所によって異なることによりライン光の散乱光成分の強度が揺らいだためと考えられる。

プルーム結像位置の光強度が最も強い位置 Fig. 8(B) の位置に光ファイバの端面を置いて計測した結果を Fig. 11 に示す。図中の実線は受光信号である。大部分を占める直流成分の上に、雑音を重ねた信号が得られている。この信号は、ほとんど全て強力なプルームによる光の一部がバンドパスフィルタを通して検出されたものによるものと考えられる。この信号に差分処理を施して得られたものが Fig. 11 の下側記載の破線である。差分処理により信号の大きさが 1/100 程度まで減少した。このことは、強力なプルームであってもその影響を無視できる程度まで少なくすることができることを示している。プルームによる電気信号は、隣接するフレーム間のプルームからの光が同量である条件  $a(n)_{\text{plume}} = b(n)$  が成り立つときに、電氣的差分処理によ

てより確かに除去することが可能となる。しかし、交流成分が含まれると  $a(n)_{\text{plume}} = b(n)$  が必ずしも成り立たなくなり、その差が未除去成分として残る。Fig. 11 の破線が示す小さな信号は、プルームが発する光のわずかな強度変化によるものである。

#### 4. 考 察

今回の実験は、イメージセンサの 1 画素分に関する基礎的な実験である。しかしながら、差分処理を行うことによって、時間的にオンオフ変調させたライン光の信号を差分処理したものの強度は、オン時の信号強度とほとんど変わらないのに対して、プルームからの光信号強度が差分処理によって大きく減少するという上記結果は、イメージセンサを用いた場合にも同様に生じるものと考えられる。

また、今回の実験では、光検出器の出力信号をオシロスコープで記録した後で計算処理を行ったものを示した。光検出器の後に差分処理用電気演算回路を接続することにより、差分処理をリアルタイムで行うことは容易であり、イメージセンサを用いた場合でも同様にできる。

さらに LD の立ち上がりの遅延によって生じた信号低下は、LD の特性に合わせた点滅をするようにパルス発振器のタイミングを調整することで抑えられると考えられる。

したがって、溶接に伴う発光がイメージセンサに入ってしまうために鮮明なライン光画像が得られず光切断法によるトラッキングができないような場合でも、今回と同様に画像差分処理を行うことによって、光切断法によるトラッキングが可能となると考えられる。このことは、曲率半径の小さい溶接線のトラッキングを行う場合のように、プルームの強い光がイメージセンサに入ってしまう場合であっても光切断法によるトラッキングが可能となることを今回の実験結果は示しているといえる。

光切断法を利用したトラッキングシステムの実用化に際してはいくつかの問題点が予想される。なかでもスペックルによるものは計測に大きく影響するので、本実験では下記のように対応した。

スペックルによる問題は、ライン光として LD 等の可干渉性の光源を使用した場合、スペックル模様が発生するためにライン光が見えにくくなり、トラッキング精度が低下することである。これは粗面にレーザ光を照射した場合に生じやすい。Fig. 12 は本実験で溶接に使用した SPCC の表面を光学顕微鏡で観察した写真である。用いたライン光の波長と半値幅で決まるレーザの可干渉性距離が 50  $\mu\text{m}$  程度であることから、スペックルを発生しやすい表面であると考えられる。この問題の対応策としては二つの方法が考えられる。一つは照射するライン光の幅を広くする方法であり、二つめは低コヒーレンスで帯域幅の広い光源をライン光の光源として使用することにより、可干渉性距離を十分に短くする方法である。

空間分解能を維持したままスペックルの影響を抑えるには二つめの方法が望ましい。しかし、本実験では差分処理を用いたトラッキングの可能性という原理的な確認を行う



Fig. 12 Surface of the sample observed under the optical microscope

目的から、身近にあった LD 光源を使い、一つめの方法である幅の広いライン光を照射することで位置分解能を犠牲にした計測を行った。

また、光源の選定に関しては、プルームの分光結果 (Fig. 7) から、今回使用した 660 nm ライン光よりも波長が短い 350 nm 程度以下のライン光の方が、プルームの光強度も弱いことからより適切な光源と考えられる。しかし、トラッキング用として十分なスペックを持つ工業用カメラの多くは高感度領域が可視光用域にある。そのため、本実験では可視光領域のライン光を用いた。将来的に紫外線領域に感度のある工業用カメラが適用できるようになれば、より鮮明な光切断画像を得ることが可能となる。

## 5. 結 論

溶接中の光切断画像からプルーム画像を実時間で差し引く画像処理により鮮明な光切画像が得られる光切断トラッ

キング法を提案した。光ファイバと光検出器との組み合わせ (イメージセンサ 1 画素のモデル) を用いて、溶接中のライン光に関する電気信号の差分処理を行うことにより、プルームからの光の影響をほとんど受けないライン光信号が得られることを実験的に示して、提案の方法が原理的に可能であることを述べた。提案した方法を使うことにより、光切断法によって、レーザー溶接と同時に複雑形状のトラッキングを行うことの可能性が示せた。

## 参 考 文 献

- 1) William, M. Steen : Laser Material Processing, Springer, (2003), 193-195.
- 2) 新井武二 : 高出力レーザープロセス技術, マニシスト出版 (2004), 211-213.
- 3) Zhang, L., Wu, C. and Zou, Y. : An On-line Visual Seam Tracking Sensor System During Laser Beam Welding, 2009 International Conference on Information Technology and Computer Science, itcs, Vol. 2, 361-364.
- 4) Haug Karsten, Pritschow Gunter : Robust laser-stripe sensor for automated weld-seam-tracking in the shipbuilding industry, Industrial Electronics Society, 1998. IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, Vol. 2, (1998), 1236-1241.
- 5) Abe, N. : Application of High Power Direct Diode Lasers to Materials Processing, IEEJ., **125-2**, (2005), 182-186. (in Japanese).
- 6) Kan, H., Miyajima, H., Sekiguchi, H. and Hiruma, T. : High Power Laser Diode and Application for Energy Source, IEEJ., **125-2**, (2005), 187-194. (in Japanese).
- 7) Tsukamoto, M., Agano, Y. and Abe, N. : Observations of plume spectra during CO<sub>2</sub> laser irradiation, 溶接学会全国大会講演概要第 58 巻, (1996), 110-111. (in Japanese)