キャンペーン特集

溶接ロボットの将来

II. これからの溶接ロボット

④ レーザ加工ロボット*

森 安 雅 治**

Welding Robot From Now On —The State of the Art of Laser Robot for Welding—*

by Masaharu Moriyasu**

キーワード：CO₂レーザ，YAGレーザ，ロボット，溶接，モニタリング，プラズマ，光ファイバー

1. はじめに

材料加工用レーザの主なもの、CO₂レーザ、YAGレーザおよびエキシマレーザの3つである。なかでもCO₂レーザとYAGレーザは本格的に実用化が進んでおり、レーザ加工機市場は1990年度まで2桁成長を続け、1991年度には780億円(2800台)になっている¹⁾。実用化されている加工分野は、溶接、切断、表面改質、穴あけ、マーキングなど広範囲にわたり、さらに適用拡大を目指して研究開発が進められている。

レーザ溶接は、大気中で幅が狭くて深い溶込み、すなわち低入熱、低変形の高品質溶接ができるため、アーク溶接や電子ビーム溶接に代わる方法として実用化が進みつつある。また加工対象ワークも大型になり、形状も二次元から三次元形状へとより複雑化している。これに対応するため、フレキシビリティの高い三次元レーザ加工熟、いわゆるレーザロボット、が開発されている。アーク溶接の場合と同様にロボット化が進み、レーザロボットが今後のレーザ加工の普及拡大、さらには次世代生産技術の鍵を握っているといっても過言ではない。

ここでは、レーザ加工機およびレーザ溶接の現状と開発動向、レーザ溶接ロボットの課題と今後の展

望について述べる。

2. レーザ加工機の市場および用途

図1は1991年のCO₂レーザ加工機およびYAGレーザ加工機の出荷台数とその用途内訳を示したものである¹⁾。CO₂レーザの用途は、95%(1216台)が切断・穴あけ、溶接は3%(38台)であり、圧倒的に

(a) CO₂レーザ

(b) YAGレーザ

図1 レーザ加工機の出荷台数と用途¹⁾

*原稿受付 平成4年10月30日

**正 員 三菱電機株式会社 生産技術研究所
Member, Mitsubishi Electric Corporation

切断の需要が大きい。一方、YAG レーザの用途は、マーカーが 34% (497 台)、溶接が 31% (449 台)、トリマーが 11% (130 台)、切断・穴あけが 6% (94 台) である。CO₂ レーザにおいて、切断用はほとんど 1.5 kW 以下の小出力機、溶接用は 3 kW 以上の大出力機が占めるため、これを金額ベースに換算すると、切断は 80% 強、溶接は 10% 弱である。この傾向はここ数年ほぼ変わっていない。

しかし、研究レベルでの動向を見ると、学会や国際会議での研究発表は、溶接や表面改質に関するものが多く、これらの分野への高い関心が伺われる。また、自動車産業での適用機運が高いことなどを考えると、今後徐々に溶接や表面改質への適用が増えていくものと考えられる。

3. レーザ加工機の現状と開発動向

3.1 CO₂ レーザ加工機

(1) 発振器

CO₂ レーザ発振器は、大出力化、高性能化、小型化、低価格化が着実に進展している。なかでも小型化の要求は非常に大きく、例えば 1 kW 級 CO₂ レーザ発振器 (電源、冷却ユニットを含む) の体積は 10 年前の約 1/2 の大きさになっている。

溶接性能の向上の要求に対応してレーザ発振器の大出力化や高集束化が図られている。国内では 10 kW 機までが標準機として製品化されており、ステンレス鋼 (SUS 304) の場合、溶接速度 1 m/min で 12 mm、0.5 m/min で 15 mm の深い溶込みが得られる²⁾。一方、米国では 25~45 kW のものが製品化されているが、まだ研究開発用が主体である。

大出力 CO₂ レーザはリングモードまたはマルチモードであり、切断などに使用される小出力のシングルヒードビームと比べて集光性能が劣る。大出力レーザの集光性を改善し加工性能の向上を図るため、新しい位相制御型共振器が開発され、シングルモードビームに近い集光性能のビームが得られるようになっている³⁾。図 2 に位相整合共振器 (PURE モード) の溶接性能を示す。溶込み能力は全体的に向上しているが、とくに高速域での能力向上が顕著である。

新しい CO₂ レーザとして、偏平な放電断面からビームを取出すスラブ型レーザの開発が進められており、500 W 級のもが市販されている。このレーザは原理的に数 10 kW 級の大出力の取出し化が可能であり、またガスの冷却はキャビティ壁面から拡

図 2 位相整合共振器式 (PURE) レーザの溶接性能³⁾

散冷却で行い、ガスを循環させるプロアーが不要であるため、発振器の飛躍的なコンパクト化が可能であることから、次世代の CO₂ レーザとして期待されている。

(2) 光学系

レーザ加工では、出力だけでなく加工点でのパワー密度 (集光ビームスポット径) も重要なパラメータである。

レンズなどの透過光学部品は、わずかであるがレーザビームを吸収して温度が上昇する。温度上昇により屈折率が変化するために、焦点距離が変化する「熱レンズ」が起こる。集光レンズの熱レンズの問題は、レンズではなく放物面鏡など金属鏡を採用により解決されている。

今後はレーザ発振器の小型・大出力・高輝度化に伴い、ビーム取出し鏡 (窓) の熱レンズ対策やガスダイナミックウインドウなど発振器からのビーム取出しが課題である。

(3) 加工機構

高速で加工すると、NC では演算時間やサーボ系の遅れなどの問題により、所望の形状が得られなくなる。NC の 32 ビット化による制御周期の短縮や新しい軌跡制御技術の適用により、高速・高精度化が実現された²⁾。

図 3 に 10 mmφ の円を描いたときの軌跡の真円度と設定速度の関係を示す。(a) に示すように、例えば 10 mmφ の穴を真円度 0.05 mm で描く場合、16 ビット NC では 1.4 m/min が限界であったが、32 ビット NC では約 2.3 倍の 3.2 m/min で描くことが

できる。このように、高速での軌跡追従性が向上しており、溶接線倣いなど軌跡のリアルタイム制御への対応能力も向上している。

加工機の移動機構としてワーク移動とビーム走査の2方式ある。これを組合せた直交3軸と、さらに回転2軸を加えた三次元レーザ加工機（レーザロボット）も普及し、溶接にも適用されている。振動を防止して高精度化を図るため、一般に門型構造が採用されている。門型構造では駆動重量が大きく、大型になると一般的には高速・高精度駆動が困難になる。

これに対して、薄板箱型構造による軽量化と空気流体軸受けの採用による駆動負荷の低減により、従来の3倍の高速三次元加工機が開発されている⁴⁾。

一方、大型高剛性の門型構造とは異なり稼働範囲が広くスペースファクタが優れた多関節型ロボットが開発されている。図4に多関節型レーザロボットの外観写真および光学系の構成を示す⁵⁾。ロボットの姿勢に応じてミラーの角度を高精度で制御するものである。なお、多関節レーザロボットは、1980年頃の三次元サレーザ加工機の開発頭初に図5に示す

(a) 設定速度と真円度の関係

(b) 真円度の比較

図3 32ビット機の従来機の軌跡真円度の比較²⁾

(a) 外観写真

(b) 光路系の構成

図4 多関節型レーザロボット⁵⁾

図5 開発所期の汎用ロボットを利用したシステム⁶⁾

図6 マルチレーザ集光ヘッドの原理と構成⁷⁾

様な汎用ロボットを応用したが開発されたが、当時はロボットの加減速時の振動などの影響で満足な加工はできなかった⁶⁾。

3.2 YAG レーザ加工機

YAG レーザは、国内で2 kW 級、国外では3 kW 級のものが製品化されている。CO₂レーザと比較すると低出力であるが、金属に対する吸収率が高い分だけ小出力でもCO₂レーザ並みの溶込みが期待できることや、ファイバー伝送できるのでフレキシブルでロボットが容易であるなどの特徴がある。

ファイバー伝送を利用すると市販の多関節ロボットに加工ヘッドを持たせることができるので、簡単にレーザロボットを構築できる。すでに、自動車製造ラインなどで輸出車などの特殊仕様品を対象とした切断・穴あけに利用されており、溶接への応用展開が期待されている。

しかし、ファイバー光学系では、ワーク表面での反射光がファイバー出口に集光されてファイバーを損傷しやすいので、その対策が望まれる。

また、図6に示すようにファイバー伝送を利用して、複数の発振器から取出したビームを加工ヘッドで合わせて一点に集光して、等価的に大出力を得ることが可能である⁷⁾。

4. レーザ溶接の現状

レーザ溶接の特徴は何と言っても幅が狭く、深い溶込みで、変形や周辺部の熱影響が小さいビードが得られることである。従来のアーク溶接、電子ビーム溶接や抵抗溶接に代わりにレーザ溶接を用いることにより、小型軽量化、信頼性および生産性の向上、生産コストの低減などの効果があることから、種々

の分野で実用化されている。

4.1 CO₂レーザ溶接

CO₂レーザの特徴は大出力が得られることであり、すでに10 kW 級レーザまでが鉄鋼圧延ライン⁸⁾や中型モータの生産ライン²⁾で実用化されている。また、自動車部品の組立溶接には早くから利用されており、もっとも実用化が進んでいる分野である。

鉄鋼圧延ラインにおいて、図8に示すように、コイルの終端と次のコイルとの先端との溶接にレーザが適用されている。従来のフラッシュバット溶接からレーザ溶接への変更により、溶接部の信頼性が向上し、接合時間の短縮や異なる板厚や異鋼種のコイル継ぎが可能になり生産性が向上している。現在5 kW および10 kW のCO₂レーザが導入され稼働している。

図9に中型モータフレームの冷却フィンの取付け溶接への適用例を示す。継手断面写真に示すように板厚差が大きく熱容量の異なるT型継手を片面から1パスで完全溶込み溶接している。このため、ひずみは極めて小さく、溶接後の機械加工が不要となり、鋼板フレーム化が可能になった。従来の鋳物フレームに比べて軽量化が達成された。

ビスカスカプリング⁹⁾、トランスミッションギヤ、プーリなどの自動車用機構部品や、オルタネータ用ステータコアなどの電装品¹⁰⁾、燃料タンクの溶接組

図7 レーザ溶接によるコイル継ぎシステム⁸⁾

(a) モータ外観

(b) 継手断面

図8 モータフレーム冷却フィンのレーザ溶接²⁾

図9 ステータコアの溶接法の変遷¹⁰⁾

立に電子ビームやアーク溶接などの代替として適用されている。図10はステータコアの溶接法の変遷を示している¹⁰⁾。レーザの採用によりステータ外形の小径化，径が異なる多品種の混流生産が可能になっている。また，燃料タンクは亜鉛めっき鋼板製であり，溶接時に亜鉛が蒸気化してブローホールが発生するという問題があるが，板の重ね部分に極わずかなクリアランスを設け，亜鉛蒸気を排出するように工夫して，レーザ溶接を適用している。

自動車ボディの製造において，図11に示すように素材段階でレーザ溶接を適用し，材料歩留りの向上，部位に応じて板厚を変えられるためコスト低減とい軽量化が図れるなど飛躍的な効果が得られている¹¹⁾。

さらに，ドイツや米国の自動車メーカでは，ボディの溶接用として門型構造の，三次元のレーザロボットがラインに導入されている^{12,13)}。5 kW レーザにより亜鉛めっき鋼板の重ね溶接を行うもので，レーザ出力のパルス制御や溶接継手のクリアランスを確保する治具の開発により亜鉛蒸気を逃して健全な溶接ビードを得ている¹²⁾。レーザ溶接ロボットの実用化が最も期待されているところである。

4.2 YAG レーザ溶接

YAG レーザの大きな特徴は，金属に対する吸収率がCO₂レーザより高いこと，ファイバー伝送ができることであろう。YAG レーザ溶接は，CO₂レーザ溶接よりも実用化の歴史は古く，200 W 以下の比較

図10 レーザによる自動車ボディ用素材の溶接¹¹⁾

図11 YAG レーザによる蒸気発生器細管の補修溶接¹⁴⁾
 的小出力のレーザを用いて，リレー接点や電池リード線，CRT 用電子銃の溶接，パワートランジスタや電池ケースのシール溶接など，電子機器，OA 機器部品の精密溶接に広く適用されている。

最近，YAG レーザの大出力化が進み，2 kW 級の発振器が製品化されている。これとファイバー伝送できるという特徴を活かして，原子炉の蒸気発生器細管の補修溶接に適用されている¹⁴⁾。図11に示すよ

うに、ファイバーで長距離伝送してレーザを外形 16 mmφ のロボットに導き、損傷部に設置されたスリーブをパイプ内部から溶接するものである。

また、自動車を狙いとした亜鉛めっき鋼板の重ね溶接において、CO₂レーザの場合と同じように出力をパルス変調することにより、ブローホールの無い良好な加工品質が得られている¹⁵⁾。

5. レーザ加工ロボットの課題

門型や多関節型の CO₂レーザロボット、ファイバー伝送を利用した YAG レーザロボットなど溶接用ロボットが開発されており、自動車ボディなど複雑な形状のワークや多品種少量品への適用が期待されている。

レーザ溶接ロボットの適用上の課題は、溶接施工に関するものとロボットシステムに関するものがある。

5.1 溶接施工に関する課題

レーザ溶接では、ビード幅が狭いために、溶接継手のギャップ精度や狙い位置精度が厳しく要求されたため、ギャップ裕度や狙い裕度の改善など、施工面での裕度拡大も重要である。図 12 はフィラーワイヤの有無での適正溶接範囲の比較である⁸⁾。ワイヤを添加することにより、許容ギャップ幅が 0.1 mm から 0.8 mm に裕度拡大することができる。また、レーザビームをウィーピングすることにより、突合わせ溶接の場合の継手ギャップ裕度や狙いずれ裕度の拡大および重ね溶接の継手強度の改善ができる¹⁶⁾。溶接ロボットへの搭載を狙いとした伝送ミラーを駆動制御する新方式のビームウィーバが開発されている¹⁷⁾。

しかし、現状においては治具の工夫などによりワーク精度の向上、安定化を図ることがレーザロボット適用する上での決め手であると言っても過言ではない。

5.2 ロボットシステムに関する課題

ロボットシステムの制御などに関する課題として、焦点位置制御や溶接線追い、モニタリングなどがある。

(1) 焦点位置制御、溶接線追い

焦点位置制御としては、加工ヘッドとワーク間との距離計測する方式が一般的である。計測法としては接触式、半導体レーザによる三角測量式や静電容量式があるが、レーザ溶接時には溶接アークと同程度の輝度を持つプラズマが発生するため、オンライ

図 12 フィラーワイヤによる溶接施工裕度の拡大⁸⁾

ンで使用するには信頼性の問題がある。

溶接線追い法としては光切断法の応用が一般的である。検出処理にファジー理論を応用した、外乱に強い高精度な追い装置が開発されている。図 13 にシステムの構成を示す。このシステムでは、3 m/min の速度でずれ角 1°まで追従することが確認されている¹⁸⁾。レーザ溶接用としては、さらに高速で追従できる装置の開発が望まれる。

また、継手のギャップ幅の検出なども必要である。

(2) モニタリング、リアルタイム制御

溶接音やプラズマの状態が溶接状態によって変化することが経験的に知られており、これらのモニタリングが検討されている。また、溶融近傍の高温部からの赤外線放射強度を検出する方法が検討され、すでに実用化された例もある。

溶接中の音の強度のモニタリングにより図 14 に示すように溶込み状態を把握できる¹⁹⁾。

図 15 に示すように焦点位置をフォトダイオードで検出でき、焦点位置制御に適用できる可能性があることや²⁰⁾、図 16 に示す用により音と光を検出することにより溶接状況ある程度把握できることが報告されている²¹⁾。Fe イオンのスペクトル線 (359 nm) を検出して、相対強度が設定値 (0.5) 以上になるように焦点位置やレーザ出力を制御することにより溶込み制御が可能であるとしている (図 17)²²⁾。

パルス溶接のビーム OFF 時に溶融池近傍からの赤外線放射 (0.9~1 μm) を検出して溶込みをモニタリングする方法が開発され、すでに実用化されている。この方法では、同時にレーザ (YAG, 1.06 μm) の反射光を検出して、光学部品の劣化などもモニタリングしている¹⁴⁾。

図13 溶接線い装置の構成¹⁸⁾ 図14 溶接音強度と溶込み深さの関係¹⁹⁾ 図15 焦点位置とフォトダイオード検出出力の関係²⁰⁾ 図16 レーザ溶接部から検出された光と音の信号²¹⁾ 図17 焦点位置のスペクトル強度に及ぼす影響²²⁾

また、加工ヘッドのノズル部で、プラズマブルームによるチャージアップにより生じる電位と熔融池から発生する衝撃波の2つを検出することにより、レーザ出力や溶接速度、焦点位置などの適応制御ができることが報告されており²³⁾、ヘッドにAE (Acoustic Emission) センサ組込むだけでよく、方向性も原理的にないので、フレキシビリティが要求されるロボット用センサとして期待される。

さらに、レーザ誘起プラズマの特性についての基礎的な研究や^{20,24,25)}、プラズマ電子密度の赤外線放射計測法の研究²⁶⁾などが行われており、これらの成果のモニタリングへの応用が期待される。

6. まとめ

ファイバー伝送を利用したYAG レーザロボット、門型や多関節型のCO₂ レーザロボットなど、フレキシブルにビームを走査できるハードウェアは整いつつある。

このハードウェアを溶接ロボットとして活用する

ためには、溶接継手設計、継手の精度管理、溶接施工方法など施工面の問題と溶接線俊い溶接モニタリングなど制御面での課題を何らかの型で解決することが要求される。

モニタリングなどの制御技術の本格的な実用化には、まだ多くの研究開発が必要であり、当面は継設計など施工面での技術開発の可否がロボットの実用化の鍵になると考えられる。

参 考 文 献

- 1) '92 年度版レーザ加工機市場の展望と戦略, ㈱矢野経済研究所
- 2) 平本, 森安: 「レーザ溶接・切断の現状および今後について」, 溶接学会溶接法研究委員会資料 No. SW-2084-91 (1991)
- 3) S. Yagi, M. Kuzumoto, A. Ohtani: "High Performance 5 kW CO₂ Laser for Industrial Use", Proceedings of LAMP '92 (1992), 91-98
- 4) 飯田: 「高速 3 次元 CO₂ レーザ加工機」, ジョイトック, Vol. 6 (1990), No. 12, 65-70
- 5) 荒井: 「レーザロボット L-1000」, 機械と工具, Vol. 34 (1990), No. 7, 88-93
- 6) G. Sepold, M. Zierau: "Present State of the art of Laser Robotics", Proceedings of LAMP '92 (1992), 219-224
- 7) I. Norris, T. Hault, C. Peters, P. Wileman: "Material Processing with a 3 kW Nd: YAG Laser", Proceedings of LAMP '92 (1992), 489-494
- 8) A. Shinmi, H. Utsumi, N. Ando, et al.: "Laser Welding and Its Applications for Steel Making Process", Proceedings of ICALEO '85 (1985), 65-72
- 9) 森: 「自動車業界におけるレーザ加工の応用」, 第 21 回レーザ熱加工研究会資料 (1989), 81-86
- 10) Y. Iwai, N. Okumura, O. Miyata: "Application of Laser Processing for Automotive Parts Manufacturing", Proceedings of LAMP '87 (1987), 517-522
- 11) K. Mikame: "Applications of Laser Material Processing in Toyota Motor Corporation", Proceedings of LAMP '92 (1992), 947-952
- 12) ライムンドフダック: 「西独自動車業界におけるレーザの利用」, ジョイトック, Vol. 6 (1990), No. 1, 29-31
- 13) C. A. Forbis-Parrott: 「キャデラックのレーザービーム溶接の適用」, ジョイトック, Vol. 8 (1992), No. 5, 94-98
- 14) T. Ishide, Y. Nagura, O. Matsumoto et al.: "High Power YAG Laser Welded Sleeving Technology for Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plants", Proceedings of LAMP '92 (1992), 957-962
- 15) 松井, 沖野, 武中, 鷲野: 「高出力 CW 励起 YAG レーザを用いた重ね溶接」, 第 26 回レーザ熱加工研究会論文集, (1991), 121-130
- 16) 小谷, 林, 金岡, 森安: 「炭酸ガスレーザの新応用」, 三菱電気技報, Vol. 63 No. 4 (1989), 281-286
- 17) 武内, 藤永, 小林: 「レーザビームウィーバの基礎検討」, 溶接法研究委員会資料 No. SW-2082-91 (1991)
- 18) 中山, 木村, 杉山: 「レーザ溶接における溶接線の検出」, 第 26 回レーザ熱加工研究会論文集 (1991), 31-41
- 19) W. Shimada, M. Kobayasi et al.: "A Study on In-Process Assessment of Joint Effecting in Laser Welding Process", 4th International Symposium of JWS (1982), 175-180
- 20) 丸尾, 宮本, 上向, 森: 「レーザ溶接のプラズマブルームの解析とモニタリングへの応用」, 第 26 回レーザ熱加工研究会論文集 (1991), 97-111
- 21) 宮本: 「レーザ溶接の将来技術」, 第 26 回レーザ熱加工研究会論文集 (1991), 251-262
- 22) 山内, 安田, 橘: 「プラズマスベクトルを利用したレーザ溶接のリアルタイム制御」, 高エネルギービーム加工研究委員会資料, HBE-62-91 (1991)
- 23) L. Li, W. Steen, K. Shi, D. Brookfield: "Sensor Development for In-process Quality Inspection and Optimization of High Speed LASER Can Welding Process", Proceedings of LAMP '92 (1992), 415-420
- 24) 小菅, 秋吉, 小野ほか: 「CO₂ レーザプロセスプラズマに関する考察」, 溶接法研究委員会資料, No. SW-1712-86 (1986)
- 25) M. Matsunawa, T. Ohnawa: "Beam-Plume Interaction in Laser Materials Processing, Transactions of JWRI, Vol. 20 (1991), No. 1, 9-15
- 26) 森安, 平本, 黄地: 「レーザ溶接ブルームの赤外線放射計測」, アーク物理研究委員会資料, No. 92-801 (1992)