

令和元年6月22日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06456

研究課題名(和文) ロボット溶接による3次元造形に関する基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental of 3D adaptive model in Robotic welding

研究代表者

山根 敏 (YAMANE, Satoshi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10191363

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：3次元造形をアーク溶接技術を用いて行うためには、その電極ワイヤを溶かして、低入熱で溶着させる方法が有効である。本研究では、アーク溶接技術とアーク溶接口ロボットを用いて、低入熱での溶着方法を検討した。これを行うために、溶接電源の特性と電極ワイヤ送給速度の高速な協調制御を行った。これにより、低入熱での溶着方法を達成した。また、CMOSカメラを用いて溶融部を観察するための方法を検討し、光学系の構成方法を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

溶接電源の特性とワイヤ送給速度の高速制御により、アーク溶接現象におけるワイヤ溶融現象への影響を解明できた。この結果を用いることにより、低スパッタの溶接方法に役立てることができる。また、アーク溶接時の分光特性の解析により、紫外光領域および近赤外光領域における溶接アークの光強度が明確になった。これにより、溶接時に発がん可能性のある紫外線の発生要因を明確にできた。また、視覚センサを用いる場合の光学系の構築方法および画像処理方法に役立てることができる。溶接品質管理などに応用できる。

研究成果の概要(英文)：In order to perform three-dimensional modeling using arc welding technology, a method of melting the electrode wire with low heat input is effective. In this study, I proposed the welding method with low heat input under the arc welding using the arc welding robot. For this purpose, I performed high-speed cooperative control between the characteristics of the welding power source and the electrode wire feed rate. Thus, the low heat input welding method was achieved. In addition, I examined a method for observing the melting area using a CMOS camera, and clarified how to construct an optical system.

研究分野：溶接・電気電子・情報

キーワード：溶接口ロボット 溶接電源制御 ワイヤ送給制御 溶融池観察 画像処理 光学フィルタ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

産業競争力の強化、産業界全体に省エネルギーおよび高信頼性の技術が求められており、3次元造形システムが実用化され、これの産業応用への期待が高まっている。一般に、紛体を用いられている。その紛体の主な材料として樹脂が用いられており、熱を利用し、樹脂を加熱し、この溶融した樹脂を積層している。しかし、機械的強度が必要なものに関しては、金属紛体を用いられている。この場合、熱源にレーザーが用いられており、粉体をステージ上に塗布して、レーザー光を照射して積層している。このため、製品精度は良いが時間がかかり、装置も高価になる。安価で生産効率の良いものが要求されている。一方、溶接システムでは、電極と溶接対象物間にアーク（電流）を発生させ、このアーク電圧と電流の積が電力となり、これにより電極ワイヤおよび溶接対象物を融かして、溶着金属を溶着させて接合を行っている。溶接ワイヤ（消耗電極）に電流を流して、ワイヤをジュール加熱するので、ワイヤ溶融量（溶着金属量）は多い。この仕組みは造形システムに適用することが可能である。ロボット溶接を用いると、自由に積層位置を設定することができ、大型の金属部材の試作が可能となる。

2. 研究の目的

溶接電源、溶接ワイヤ送給装置および溶接ロボットを用いて、これらを協調して高速制御することで、溶接ワイヤを溶融・溶着させることで金属を対象にした3次元造形システムを構築するための基礎研究を行う。さらに、視覚センサを用いて、溶接位置制御のために最適な溶融部の検出方法を検討する。

3. 研究の方法

(1) ロボット溶接協調システムの構築

3次元造形を行うためには、溶接中に入熱を抑えて、溶滴移行を行う必要がある。これを行うために、溶接電源、ワイヤ送給装置、溶接ロボットの連携が必要になる。まず、パソコンにより溶接電源を直接制御できるように改造する。従来、ワイヤ送給装置は溶接電源からの指示により一定速度でワイヤを送出している。低入熱にするために、溶接電流波形に同期したワイヤ送給速度制御が必要であり、これをパソコンにより行う。さらに、トーチモーションも同期させるために、パソコンにより、これらの装置の同期を行うようにする。

(2) 画像処理システム

溶接状況の監視および制御を行うためには視覚センサが有用である。そこで、CMOSセンサを用いて、溶融池撮影を行う。ここで、良好に撮影するところが重要であるので、溶融池とアーク光の分光特性を計測し、最適な光学フィルター構成を検討する。さらに、溶融池を画像処理する。

4. 研究成果

溶接電源内部のインバータ制御回路に、パソコンからインバータ制御指令を読み込めるように改造を行った。そのインバータ制御周波数は15kHzであり、必要とされる電圧になるように、パソコンから直接インバータ制御への指令値を出せるようにした。溶接トーチを含む回路では、溶接電流を i 、電源電圧 $E(i)$ （パソコンからの指示値）、溶接電源内のリアクタンス L とすると L の電圧降下は電源電圧と電流供給点電圧（溶接トーチ電圧） v_t の差に等しいため、

$$\frac{di}{dt} = \frac{E(i) - v_t}{L} \quad (1)$$

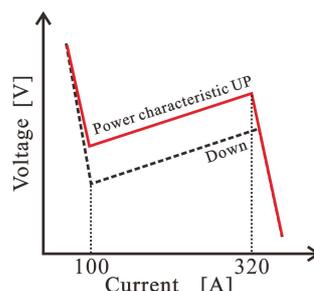
となり、 v_t が電源電圧 $E(i)$ より低い場合、電流 i が増加する。この特徴を用いて、溶接状態に従って、アーク長を一定に保った。低入熱で溶接を行うために、溶接ワイヤを溶融池に短絡させるのに、適した電源特性を検討した。その結果、図1(a)および(b)に示す3種類を用いた。これを行うために、パソコンにAD変換器およびDA変換器を搭載し、電流センサとAD変換器により電流値 i を検出した。インバータ制御式溶接電源を用いているために、電源電圧は図2に示す出力となる。すなわち、無負荷時で55Vの出力となる。インバータへの指示値（DA変換器の出力電圧）を最大電圧で55Vに対応させて換算した。計測した電流 i と図1の関係をjを用いて、出力すべき電源電圧 $E(j)$ を決定した。この電圧になるようにパソコンからのインバータへの指示値を決めた。これを用いることによりパソコンから、溶接電源の電源特性を直接制御できるようにした。溶接時に溶接ワイヤの先端を溶融させるために、電源特性を図1(a)の実線の実線特性（電源特性 U_p ）にした。溶接電圧（電流供給点電圧 v_t ）が実線の溶接電圧よりも高くなるので、アーク長の状態に従って、溶接電流は約350A付近のピーク電流になる。これにより、ワイヤ先端は溶融する。しかし、溶滴移行ができるほどはワイヤ先端部を溶融しないように調整し、パルス期間を3ms程度とした。アーク長が長すぎる場合、溶接電圧 v_t が電源電圧 $E(i)$ より高くなり、電流が自動的に減少する。パルスピーク電流期間後は、電流をベース電流に切り替えるために、電源特性を図1(a)の破線の実線特性に切り替えた。これにより、電源特性 $E(i)$ との差に従って、電流が減少する。すなわち、アーク長が長すぎる場合、電流減少が早くなり、自動的にアーク長が調整される。また、アーク長が短い場合は電流減少が遅くなる。この結果、ワイヤ先端部に安定に溶滴を形成できる。その後、ワイヤ送給に従って、ワイヤ先

端部が溶融池に近づいていく。溶融池に安定に溶滴が接触できる電流を調べた結果、約 100A であった。図 1 (a)の破線の電源特性において、アークが発生している場合、動作点は、破線の垂下部分になり、電流は 100A 程度の定電流となる。ワイヤ先端が溶融池と接触したとき（短絡時）、アークがなくなるために電圧が低下した。短絡時に、破線の特性のままにすると、アークがなくなった分だけ抵抗値が減少するために、電流が急激に増加し、ワイヤ先端と溶融池との接触が切り離される。これを防ぐために、AD 変換器で電圧を検出し、短絡状態を検出したら、電源特性を図 1 (b)の実線に切り替えた。これにより、電流は電流供給点電圧とは無関係に、ほぼ 100A 付近で安定する。この特性を 1ms 程度継続すると安定に短絡した。その後、電源特性を図 1 (a)の破線に変更する。これにより、短絡時の状態に従って、電流を若干増加させることができた。これに合わせて、ワイヤ送給方向を逆転させる。これにより、低い電流で、溶融池とワイヤの接触が開放される。しかし、開放時に、電圧が急変するために、急激に電流が増加する場合があった。その後、アークを安定化するために、電源特性を図 1 (a)の実線の特性に切り替えて、ワイヤ送給方向も通常の状態に戻した。以後、これを繰り返して、溶滴移行が行えるようにした。

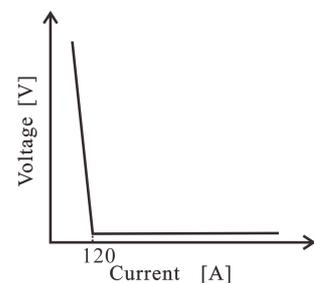
従来のインバータ制御では電流制御が一般的であり、アーク長を制御するために、細かな調整が必要であった。しかし、本研究の方法を用いれば、溶接状況に従って、アーク長が自己制御する機能を持っているので、従来よりもアーク長および溶滴移行の制御を行いやすくなっている。

また、ワイヤ送給モータ自体も溶接中に正転と逆転を切り替えられるようにすることが必要になった。低電流状態で、短絡状態からアーク状態に切り替えるために、モータを逆転させる。溶接中にモータを正転および逆転させるために、高速応答するサーボモータが必要になった。従来、プリントモータが用いられているが、このモータに正転および逆転信号を与えても、応答に 0.2s 程度かかった。このため、モータにサーボモータを採用し、さらに、高速で正転および逆転を繰り返すため、放熱構造を持つものが必要になり、適した構造のものを用いた。さらに、電源特性を制御しているパソコンと同期させるために、同じパソコンから RS-422 を用いて、ワイヤ送給装置のドライバを制御した。しかし、パソコンからワイヤ送給速度指令に対する応答特性を調べたところ、制御指令値の反映が 1ms 以下を達成するのが困難であった。そこで、溶接電源特性の切り替えタイミングに従って、モータの正転および逆転を行う方式にした。これにより溶接電源の特性制御と協調して、低入熱の溶接結果を得た。一般には、溶接電源制御とワイヤ送給速度制御は同期していない。本研究では、ワイヤ溶融量の支配的な因子である溶接電流とワイヤ送給速度を同時制御できるために、従来よりも安定した溶接を実現できる。

溶接位置を確認するために視覚センサとして CMOS カメラを用いて、溶融池状態を撮影した。950nm の干渉フィルターを用いるとアーク光の影響を軽減できることは知られているが、このフィルターが最適かどうかは明らかになっていない。そこで、分光器を用いて、溶接時の発光スペクトルを計測した。電流が 100A のときのアーク光の相対強度を計測した結果を図 3 に示す。主な発光スペクトルは紫外線領域になっている。しかし、青色 (400-600nm) 付近にも発光スペクトルが存在している。シールドガスの影響で 770nm にも酸素スペクトルがある。また、溶融池の分光特性も計測したところ、600nm から赤外にかけて発光輝度は高くなる。このため、770nm の発光スペクトルの影響を避け、光強度を得るためには、930nm 以上のハイパスフィルターが有用であることがわかった。従来の 950nm 付近の干渉フィルタでは、フィルター自身の透過効率が 50%と低いために、溶融池の輝度が下がることがわかった。この知見はロボット溶接に CMOS センサなどの視覚センサを用いた溶接溶融池現象を観察するとき最適光学フィルター選定に有用である。



(a) ピークおよびベース電流時



(b) 短絡時

図 1 電源特性

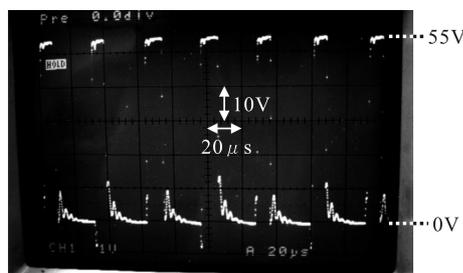


図 2 電源電圧出力

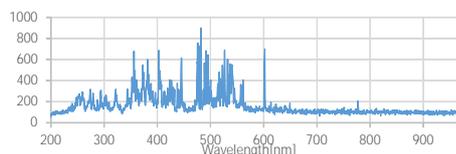


図 3 溶接アークの分光特性

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

- WANG Weixi, WANG Qi, YAMANE Satoshi, HIRANO Takaaki, HOSOYA Kazumichi, NAKAJIMA Toru, YAMAMOTO Hikaru, Tracking using pattern matching of keyhole in visual robotic plasma welding, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 査読有、98巻、pp.2127- 2136、<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2358-2> (2018)
- HIRANO Takaaki, WANG Weixi, YAMANE Satoshi, NAKAJIMA Toru, HOSOYA Kazumichi, YAMAMOTO Hikaru, Observation and Control of Keyhole in Robotic Plasma Welding, 溶接学会論文集、査読有、35巻、173s-176s、<https://doi.org/10.2207/qjaws.35.173s>(2017)
- TAKAHASHI Ayumi, YAMANE Satoshi, YOSHIOKA Nobuyori, KOHANAWA Akihiko, YAMAMOTO Hideki, Numerical Simulation in high efficiency spot welding, 溶接学会論文集、35巻、177s-180s、<https://doi.org/10.2207/qjaws.35.177s>(2017)
- WANG Weixi, YAMANE Satoshi, KOIKE Tomoyuki, TOMA Jiro, HOSOYA Kazumichi, NAKAJIMA Toru, YAMAMOTO Hikaru, Image processing method for automatic tracking of the weld line in plasma robotic welding, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 査読有、86巻、pp 1865-1872、10.1007/s00170-015-8311-8(2016)
- WANG Weixi, YAMANE Satoshi, SUZUKI Hikaru, TOMA Jiro, HOSOYA Kazumichi, NAKAJIMA Toru, YAMAMOTO Hikaru, Tracking and height control in plasma robotic welding using digital CCD camera, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 査読有、87巻、pp 531-542、10.1007/s00170-016-8437-3 (2016)
- YAMANE Satoshi, WANG Weixi, KOIKE Tomoyuki, TOUMA Jiro, HOSOYA Kazumichi, NAKAJIMA Toru, YAMAMOTO Hikaru, Observation of keyhole in visual plasma welding robot, 溶接学会論文集、査読有、33巻、171s-174s、0.2207/qjaws.33.171s(2015)

[学会発表](計14件)

- 山根 敏、駒谷 大樹、溶接溶融池の分光特性と溶融池撮影、第245回溶接学会溶接法研究委員会、2019年
- 山根 敏、駒谷 大樹、MAG 薄板溶接における溶融池のセンシングによる溶接線おい制御、第243回溶接学会溶接法研究委員会、2018年
- YAMANE Satoshi、Application of Pattern Matching of Weld Pool to Seam Tracking in Robotic Welding, World Congress of Robotics-2018 (招待講演)(国際学会)、2018年
- 山根 敏、溶接溶融池からの放射輝度の計測、溶接協会ロボット溶接研究委員会、2018年
- 松尾 光毅、山根 敏、平野 敬章、中嶋 徹、細谷 和道、高橋 毅、山本 光、プラズマ溶接への深層学習の適用、平成30年度秋季全国大会、2018年
- 駒谷 大樹、山根 敏、溶接溶融池における分光特性の測定、平成30年度秋季全国大会、2018年
- 平野 敬章、王 維西、山根 敏、細谷 和道、中嶋 徹、山本 光、プラズマ溶接におけるキーホルのセンシングと制御、溶接学会平成29年度春季全国大会、2017年
- 高橋 亜友美、山根 敏、吉岡 信頼、小埜 明比古、山本 英樹、抵抗スポット溶接シミュレーションにおける接触抵抗の影響の考察、溶接学会平成29年度春季全国大会、2017年
- YAMANE Satoshi、OHYAMA Hiroyuki, Tracking of the welding line in lap welding using pattern matching, 10th International Conference on Trends in Welding Research (国際学会)、2016年
- YAMANE Satoshi、WANG Weixi, HIRANO Takaaki, HOSOYA Kazumichi, NAKAJIMA Toru, YAMAMOTO Hikaru, Tracking Using Pattern Matching of Keyhole in Visual Robotic Plasma, 10th International Conference on Trends in Welding Research (国際学会)、2016年
- HIRANO Takaaki, WANG Weixi, YAMANE Satoshi, HOSOYA Kazumichi, NAKAJIMA Toru, YAMAMOTO Hikaru, 4th International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation (国際学会)、2016年
- 平野敬章、王 維西、山根敏、細谷和道、中嶋徹、山本光、プラズマ溶接におけるキーホルの画像処理、溶接学会平成28年度春季全国大会、2016年
- 王 維西、小池伴幸、山根敏、細谷和道、中嶋徹、山本光、プラズマ溶接におけるCCDカメラによる溶接線おい制御、溶接学会溶接法研究委員会、2015年
- 大山 裕之、王 大路、山根 敏、開先溶接における CCD カメラの適用、溶接学会平成27年度秋季全国大会、2015年