

令和 4 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：2019～2021

課題番号：19K05076

研究課題名(和文) 視覚ロボット溶接システムにおける深層学習による溶接溶融状態の推定と制御

研究課題名(英文) Control and estimation of weld pool in visual robotic welding using deep learning

研究代表者

山根 敏 (Yamane, Satoshi)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：10191363

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：溶接システムにおいて溶融状態の推定を行うために、深層学習を適用した。これを行うためには、明瞭な溶融池画像の撮影が重要である。そこで、視覚センサの特性およびアークならびに溶融池の分光特性を調査し、良好な溶融池撮影条件を明確にした。これを用いて、ギャップ変動のあるV開先溶接を対象として、溶融池画像から深層学習の一つであるResnet50を用いて、開先ルート部の溶融状態を推定した。また、溶融池画像から溶融部と未溶融部との境界推定をセマンティック・セグメンテーションにより行った。その結果を溶接線倣い制御に応用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

画像を入力する深層学習により、状態推定を行う場合、深層学習の推定性能は画像の前処理に依存することを示し、特徴抽出の画像処理方法を示した。また、溶接状態を数値化して推定する場合、教師ありの深層学習を適用すると、多数の画像データおよび、それに対応する教師データ(数値データ)を用意する必要がある。これには、多大なる時間と労力が必要となる。しかし、分類を行う場合は、数値推定より時間がかからないとともに、学習時間を短縮化できる。さらに、深層学習の分類出力から数値データを得るための方法を示した。これらの方法はビックデータを深層学習により処理する場合にも適用できる。

研究成果の概要(英文)：Deep learning was applied to estimate the molten pool condition in a welding system. In order to do this, it is important to capture clear images of the molten pool. Therefore, we clarified good conditions for capturing images of the molten pool by considering the characteristics of visual sensors and the spectral characteristics of the arc and molten pool. Using this method, the molten pool image was used as an input to Resnet50, a deep learning system, to estimate the molten state of the root of the groove for V-gap welding with gap variation. The boundary between the molten and unmolten areas was estimated from the molten pool image using semantic segmentation, and this was applied to weld line imitation control.

研究分野：溶接工学、制御工学

キーワード：溶融池観察 深層学習 GMA溶接 プラズマアーク溶接 画像処理 Resnet50 セマンティック・セグメンテーション 溶接線倣い制御

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建設機械などの車体の軽量化、タワーや建物および橋梁など鋼構造物の需要と安全性の要求が高まっている。とくに、これらの鋼構造物の機械的強度は材料そのものの特性だけでなく、接合部の品質（溶接状態）に依存している。安心・安全性の観点から、品質の管理、高信頼性が要求されている。接合方法としては、電極を消耗しないプラズマアーク溶接方法と消耗電極を用いた GMA 溶接法などがある。これらの溶接方法では、接合部のギャップ変動などの外乱などが生じると良好な結果が得られない。この外乱に対応して熟練溶接作業者が溶接条件の調整を行っているが、溶接アーク及びヒュームの発がん性の問題および作業者の高齢化および減少に対応するため、自動化技術を用いた技量減少および技能伝承が重要な課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、1) 溶接表面からの情報を良好に取得するために、スパッタや強い溶接アーク光の影響に関わらず、視覚センサ（CMOS カメラなど）を用いた溶融部の最適な直接撮影方法の確立、2) 直接計測が困難な溶融部深さを、溶接表面から得られる情報（溶融池状態）から裏面状況の推定、および 3) 基礎実験で得られるデータはビックデータとなり、このデータを処理するための深層学習方法の確立である。

3. 研究の方法

(1) 視覚センサ付きロボット溶接制御システムの構築

溶融状態を識別するために、近赤外領域まで、感度帯域を持つ CMOS カメラが有用である。そこで、このカメラを用いて、溶融池撮影を試みる。また、明瞭に撮影するためには、アーク光の軽減が有用である。そこで、溶接電流波形に適した撮影方法およびアーク光の影響を軽減するための干渉フィルターが有用であり、基礎実験において分光測定を行う。また、溶接状態の再現性が有用であるので、溶接姿勢が変化しないようにするために、6 軸の産業用ロボットに同期させた 2 軸 XY-テーブルを構築する。

(2) GMA 溶接への深層学習の適応

パルス溶接を用いて、V 開先を持つ溶接材料の接合の基礎実験を行う。実験では、セラミック製裏当て材を接合部分の裏面に貼り、セラミック材の溶融状態を溶融池画像から推定し、V 開先のルート部の溶融状況との関係を求める。さらに、レーザセンサで計測した裏ビード幅および高さを計測する。これらの結果を用いて、深層学習により、接合部の溶融状況の分類を行う。

(3) プラズマアーク溶接における深層学習を用いた溶接線・検出およびおい制御

非溶極式であるプラズマアーク溶接において、溶接線おいを行うために、溶融部と未溶融部の境界・検出のための基礎実験を行う。具体的には、溶接線からずれた場合の実験を行い、キーホールを含む画像から溶融部と未溶融部の特徴の検出を行う。その後、セフォマ・セグメンテーションを行い、溶融部と未溶融部との境界を検出する。その結果をもとにデジタル制御器を構築し、溶接線のおい制御を行う。

4. 研究成果

(1) 溶融池観察方法

ロボット溶接システムを図 1 に示す。基礎実験を容易に行うために 6 軸溶接ロボットおよび 2 軸サーボモータを持つ XY テーブルを組み合わせて用いた。溶接電源の溶接信号に同期して、PLC1 (Programmable Logic Controller) により、この XY テーブルのサーボモータを同時制御して、所要の溶接速度になるように制御を行った。ロボット制御用 PC により 6 軸溶接ロボットはトーチ揺動のみを行うように制御した。そのトーチに近赤外領域まで検出できる 400nm-1100nm の範囲に分光感度を持つ CMOS カメラ (UI-3240CP-NIR-GL) を用いた。市販のパルス溶接電源を用い、溶接電源制御用 PC から DA 変換器を用いて、溶接電流および溶接電圧を指定した。ワイヤ送給速度に関して溶接電源制御用 PC から RS-422 を介してワイヤ送給装置のドライブ

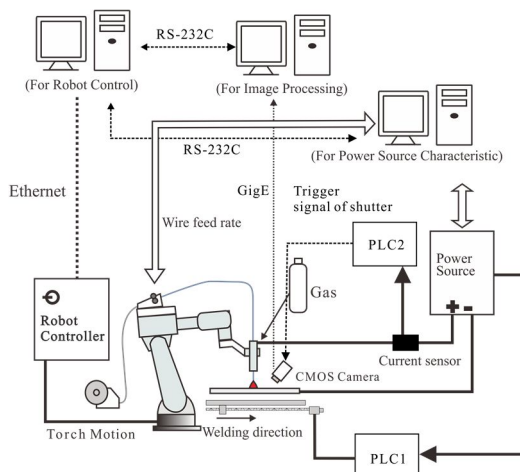


図 1 溶接システム

システムを制御した。溶接溶融池を明瞭に観察するために、アーク光の影響を軽減する必要がある。減光 (ND) フィルタを用いると、アーク光の影響を小さくできるが、画像における輝度が減り、溶融部と未溶融部とのコントラストが悪くなる。そこで、適正なフィルタを検討するため、200nm-1000nm の検出範囲を持つ分光器を用いてパルス溶接において、アーク点から約 150 mm 離れた箇所でアーク光の発光強度および溶融池の発光強度を計測した。発光強度が強いため、分光器のシャッタ期間を 1ms に設定した。さらに、分光器の計測用光ファイバーの前に 840nm 以上の波長を通過させるロングパスフィルタを設置し、発光強度を測定した。その結果を図 2 に示す。ベース電流期間はピーク電流期間より、発光強度は低くなる。また、940nm 付近に発光強度のピークがある。一方、溶接終了直後に、同じ分光器で、溶融池の発光強度を計測した。溶融池の発光強度は 600nm 付近から波長が長くなるに従って高くなっている。また、一般に近赤外線用 CMOS カメラの検出特性は 1000nm 付近で感度がなくなる。このカメラ特性と発光強度特性を考慮し、940nm 以上のロングパスフィルタを使用した。また、パルス電流のベース期間に同期させて、CMOS カメラのシャッタを開くトリガ信号を生成し、この信号に同期させて、溶融池画像を撮影した。セラミック材の溶融状態に従った 3 種類の溶融池画像を図 3 に示す。

パルス溶接において、市販の溶接電源を用いたときに改造せずに、明瞭に溶融池を撮影する方法を示し、一般の溶接システムにも適用できる。また、従来、干渉フィルタは経験により用いられていたが、このフィルタと溶融池画像との関係が明確になった。

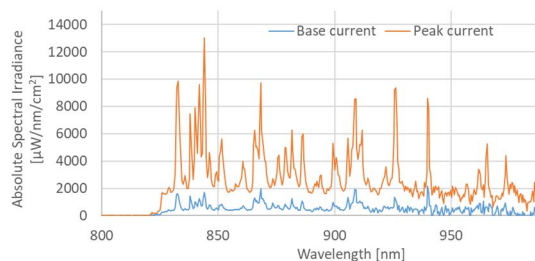


図 2 パルス溶接電流における分光特性

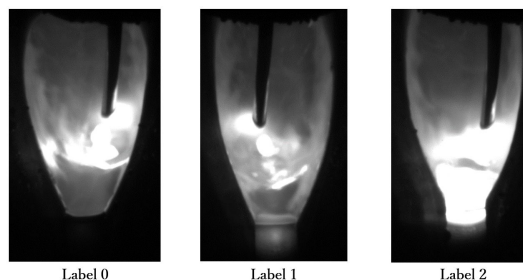


図 3 典型的な溶融池画像

(2) 深層学習によるパルス MAG 溶接の開先ルート部の溶融状態推定

溶接速度 1.92mm/s で、4mm ギャップにおいて、基礎実験を行った。溶接開始時は母材が冷えているため、開先ルート部の溶融が少ない。溶接進行とともに、電極ワイヤ直下に対して溶融池は後退し、セラミック製裏当て材に直接熱が伝わり、これが溶融した。また、別の基礎実験において、溶接終了直後の溶融池画像と干渉フィルタを取り除いたときの画像の関係を調べたところ、溶融池画像の先端部が白くなっている場合 (図 3 の Label 1)、セラミック材が赤熱して溶融している状態に対応しており、ワイヤ直下に溶融池がなくなっていた。さらに、セラミック製裏当て材が溶融すると、図 3 の Label 2 に示すように溶融池前方の開先内が白く白熱する。これらのことより、溶落ちが生じる場合、セラミック製裏当て材の溶融が激しくなる。このように、溶融池前方部はセラミック材の溶融状態を示している。アーク圧力の影響および溶滴移行により、溶融池に入熱し、その熱によりセラミック製の裏当て材が溶融していると考えられる。このことから、セラミック製裏当て材の溶融状態を識別することにより、開先ルート部の溶融状態を推定した。

溶融池画像から開先ルート部の溶融状態を深層学習により求めるためには、多量の教師データが必要になる。溶接後の裏ビード形状をレーザセンサ変位計で計測した結果 (ビード幅) を教師データとした場合、溶融池画像とビード幅変化に遅れなどが存在するため、推定が困難であった。すなわち、ワイヤ直下が溶融池前方に来ている場合、直接、開先のルート部に入熱するので、その部分の溶融は速くなる。一方、ワイヤ直下が溶融池の中心部にある場合、開先ルート部の溶融要因は溶融池による熱伝導が主流になると考えられ、入熱の変化に対する開先ルート部の溶融に時間遅れが生じる。本研究ではワイヤ直下の溶融池の形状から、セラミック製の裏当て材の溶融状態を 3 分類に識別し、これらを Label 0 から 2 に対応づけた。また、これらは開先ルート部の溶融状態にも対応している。セラミック材が加熱されて、セラミック材の溶落ちが生じる前は、溶融部前方部が若干明るくなり、これを Label 1 に対応づけた。セラミック材が溶融し、ワイヤ直下に溶融池は存在していなく、溶落ちが生じている。この状態を Label 2 に対応付けた。基礎実験の溶融池画像において、人の目により、溶融池前方部の状態が変化する領域のみに着目し、ラベル付けを行えば、教師データの生成時間を短縮できる。

溶融池画像全体を深層学習の畳み込みニューラルネットワーク (CNN) の入力とすると、画像サイズが大きいため、処理時間がかかる。そこで、開先形状自体が開先ルート部の溶融状態に影響を与えるのではなく、溶融池前方の状態が開先ルート部の溶融状態と関連するとした。ここでは、Tensorflow により図 4 に示す ResNet50 を構築し、画像内の溶融池部の先端を切り出して、これを入力画像とした。その切り出し部分の大きさは 100 × 200 ピクセルとした。これを 64 × 64 ピクセルに圧縮し、ResNet50 の入力とした。また、出力はラベル 0、ラベル 1 およびラベル 2 のそれぞれの類似度の値 p0、p1 および p2 とした。その出力関数はソフトマックス関数である。この

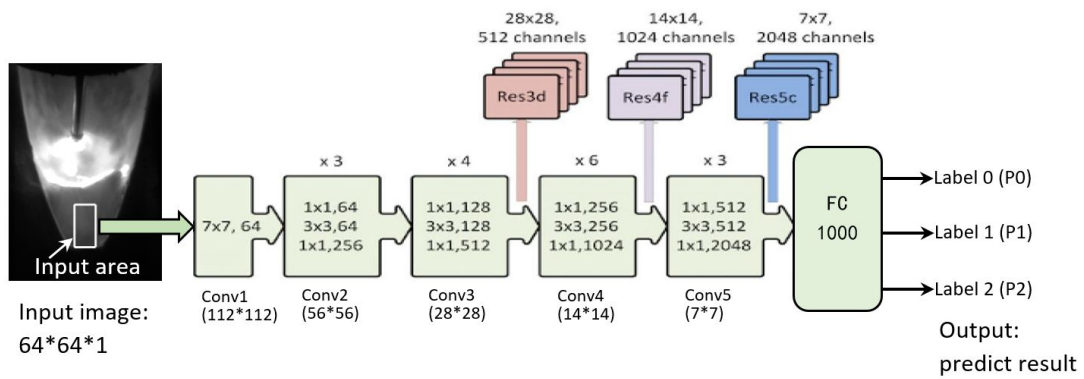


図4 Resnet50のネットワークによる推定

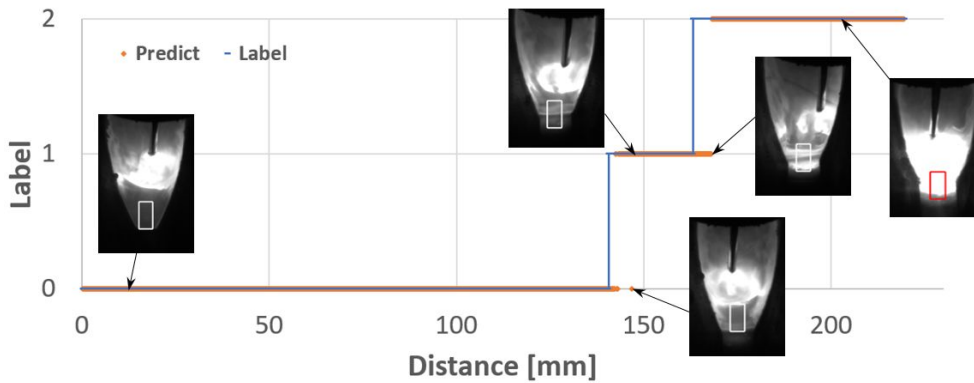


図5 推定出力結果

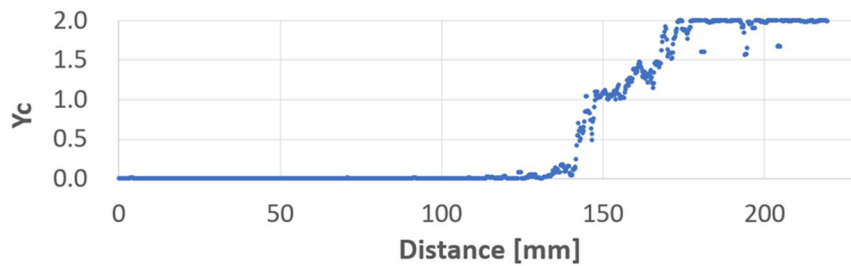


図6 y_cの出力結果

関数は分類問題に適しており、 $p_0+p_1+p_2=1$ を満たす値を出力する。図5にテーパ状にギャップを変化させた場合の推定出力を示す。ラベル変化は予測値に良く合う値を得ることができた。制御に適用するためには連続値が必要になる。ここでは、類似度に着目し、出力の重心 y_c を次式に従って、計算した。 l_0 、 l_1 および l_2 は、それぞれラベルの値である。

$$y_c = \frac{(l_0 + 1) \cdot p_0 + (l_1 + 1) \cdot p_1 + (l_2 + 1) \cdot p_2}{p_0 + p_1 + p_2} - 1 \quad (1)$$

図5に対応する y_c の出力を図6に示す。同図より、分類値(図5)から連続値に変換でき、教師データ構築時間を短くすることができ、他の深層学習での教師データ構築時間の短縮に貢献できる。これを用いれば、溶接条件への調整にも役立てることが可能となる。

(3) プラズマアーク溶接における溶接線あい制御

前述のGMA溶接ではコントラストの違いにより、2値化方法で、溶融部境界が識別できるが、非溶極式溶接では、GMA溶接と異なり、電極ワイヤが過熱・溶融しないので、母材上の溶融部と未溶融部の境界が明確にならず、2値化方法を適用すると推定ミスが生じた。しかし、人間の目で識別すると、およそその溶融部境界の識別が可能となる。そこで、深層学習の一種であるセマンティックセグメンテーション方法を溶融池識別に適用した。図7に溶融池画像および推定結果を示す。溶融

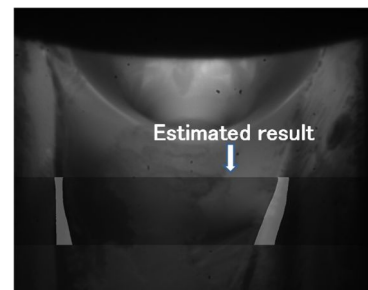


図7 プラズマアーク溶接溶融池画像

池画像の一部分を切り出し、その部分を識別した。図 8 に示すように、入力画像に対して、溶融部分と未溶融部分の境界に相当する箇所を 1 とし、それ以外を 0 とし、トレーニング画像を構築した。基礎実験で求めた 1378 枚の画像を用いて、学習を行った。深層学習の性能は損失関数に依存する。ここでは、分類に適合したバイナリクロスエントロピー関数を用いた。学習が進むにつれて、損失関数の値が 1 から 0 に徐々に近づき、最終的の Epoch で教師データに関して精度は 0.99、Loss は 0.012 で収束した。一方、試験データに対する精度は 0.96、Loss は 0.033 となった。



図 8 入力画像と教師画像

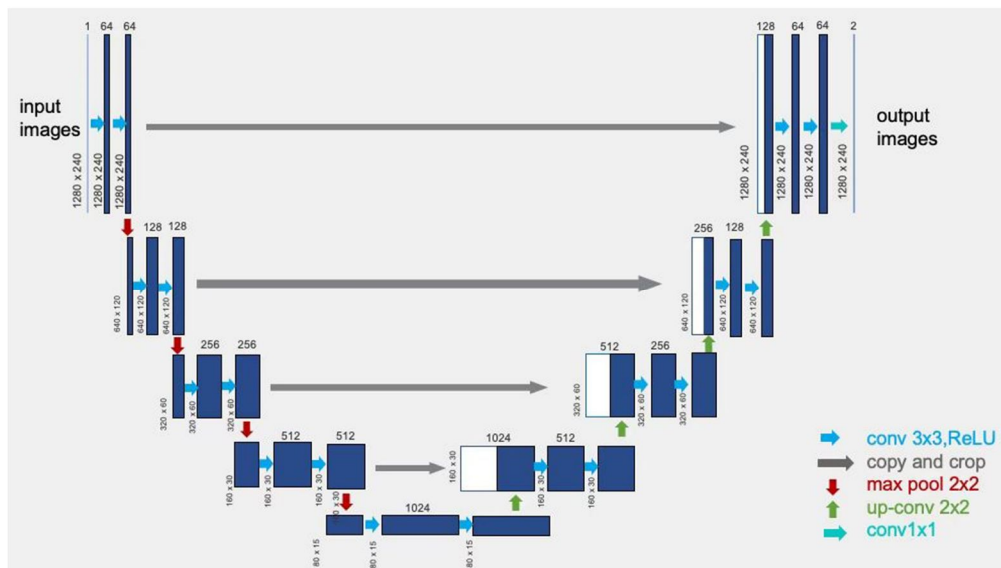


図 9 セフォマ・セグメンテーションのための U-Net



図 10 溶接線の推定結果

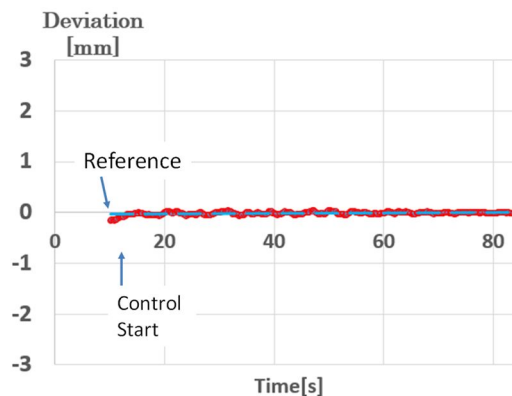


図 11 溶接線おい制御結果

入力画像に対する図 9 の U-Net の出力は、図 10 に示すように画像となる。この画像において、左右の境界部分は白い塊で表示される。このままでは、溶接線位置の推定が困難である。

この白い線の中心部分を求めるのに、通常画像処理を行う。その結果から、境界線間の中心を求める。この中心が 2 枚の板の突合せ部分に対応する。画面の中心はあらかじめ、プラズマトーチの中心に対応している。そこで、デジタルコントローラを構築し、溶接線のおい制御を行う。制御性能を調べるために、溶接開始位置をおよそ溶接線に合わせて、溶接終了位置を 3 mm ずらして、教示した。溶接制御の開始とともに、プラズマトーチ位置を制御し、中心に倣うように制御した。その様子を図 11 に示す。同図に示すように、 ± 0.3 mm 以内に制御が行え、良好な溶接線の追跡結果を得ることができた。

この方法では、非溶極式溶接方法に対して、この画像認識および制御方法は有効であると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yamane Satoshi、Matsuo Kouki	4. 巻 60
2. 論文標題 Adaptive Control by Convolutional Neural Network in Plasma Arc Welding System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 998 ~ 1005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamane Satoshi	4. 巻 60
2. 論文標題 Tracking the Welding Line in Lap Welding Using Pattern Matching	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 1752 ~ 1757
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-319	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 KOMAYA Daiki、YAMANE Satoshi	4. 巻 38
2. 論文標題 Spectroscopic Measurement of the Arc and the Weld Pool in Robotic Welding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY	6. 最初と最後の頁 59s ~ 63s
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2207/qjws.38.59s	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Satoshi Yamane, Kouki Matsuo	4. 巻 13
2. 論文標題 Gap Detection Using Convolutional Neural Network and Adaptive Control in Robotic Plasma Welding	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 796-802
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2019.p0796	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 山根 敏, 王 伝智, 張 格イ	4. 巻 39
2. 論文標題 深層学習によるパルスMAG 溶接の開先ルート部の溶融状態推定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 溶接学会論文集	6. 最初と最後の頁 322 ~ 333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2207/qj jws.39.322	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 王伝智, 張格イ, 李寧, 山根 敏
2. 発表標題 深層学習の溶接溶融池の画像処理への適用
3. 学会等名 溶接学会2020年秋季全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daisuke, KOMAYA, Satoshi YAMANE
2. 発表標題 pectroscopic Measurement of the Arc and the Weld Pool in Robotic Welding
3. 学会等名 Visual - JW2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山根 敏、駒谷 大樹
2. 発表標題 溶接溶融池における分光特性の測定
3. 学会等名 溶接学会溶接法研究委員会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 張 格イ、王 伝智、李 寧、山根 敏
2. 発表標題 GMA溶接における溶接溶融池への深層学習の適用
3. 学会等名 2021年度溶接学会春期全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李 寧，王 伝智，張 格イ，山根 敏
2. 発表標題 プラズマ溶接における溶接溶融池画像への深層学習の適用
3. 学会等名 2021年度溶接学会春期全国大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関