

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03806

研究課題名（和文）溶接モニタリングと深層学習の融合による溶接品質その場推定と判断根拠の可視化

研究課題名（英文）In-situ estimation of welding quality and visualization of basis for the decision by combining welding monitoring and deep learning

研究代表者

野村 和史（Nomura, Kazufumi）

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90397729

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ロボットによる自動アーク溶接は様々な産業分野で利用されているが、母材間ギャップやワイヤ狙い位置ズレといった外乱に左右され、溶込み深さなどの溶接品質が不安定になりやすい。このような課題に対して我々は、溶接現象のモニタリング画像から溶込み深さを推定するCNNベースの機械学習モデルを構築しその有効性を確認した。ただし機械学習モデルではしばしば問題となるBlack Box化や一部で推定精度が低いといった課題があった。そこで本研究では、判断根拠の可視化法の適用を通して入力画像の重要な領域を見出し溶接現象との物理的な関係を明らかにし、さらに入出力関係をシフトすることでより高精度な推定モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

昨今の機械学習は画像との相性が非常に高く溶接分野においても応用があり、画像から人の目でわかる特徴点を算出する操作を自動化したものが少なくない。本研究は、溶融池モニタリング結果を直接溶接品質と関連させ、重要な特徴量を可視化する手法の提案とその評価をしたものである。これは、人の目では一見わからない職人技能の可視化であり、真の自動化のためには必須であるといえる。一見してBlack Box化したAI応用技術であっても、物理的な溶接現象を反映したものであることが可視化され、更に入出力関係を吟味することで精度の高いモデルが構築できることを示すことができたことは学術的にも工学的にも非常に意義深いと言える。

研究成果の概要（英文）：Robotic arc welding, a process used in various industrial fields, often encounters challenges unstable welding quality due to disturbances such as the gap fluctuation between the base materials and the misalignment of the wire target position. In response to these issues, we have developed a CNN-based machine learning model that estimates penetration depth from monitoring images of the welding phenomenon. Our model has been effective, but it also has its limitations, including being black-boxed and having low estimation accuracy in certain areas. In this study, we have visualized the basis for decision to identify important areas in the input image and clarify the physical relationship with the welding phenomenon. Moreover, we constructed an improved estimation model by shifting the input-output relationship.

研究分野：溶接, AI, 検査・計測

キーワード：アーク溶接 モニタリング 溶込み深さ AI CNN 機械学習 判断根拠の可視化

1. 研究開始当初の背景

アーク溶接法は、数ある接合プロセスの中でも簡便性やエネルギー効率の高さなどの理由から製造業の各分野における不可欠な技術となっており、更なる高品質化、高効率化が常に求められている。ただし、熟練技術者の減少、製造拠点の海外移転、人材不足など、多くの製造分野で見られる社会問題にも直面しており、アーク溶接は、技術を継承・維持しながらも発展させていかねばならない、社会を支える基盤技術であると言える。そうした課題の解決策の一つとして、ロボット溶接による製造の自動化が進められており、多くの現場で既に運用されている。しかし、アーク溶接プロセスに伴う様々な外乱のために継手性能の完全な保証は未だに出来ていないのが実情である。例えば、箱物の構造物の角部にはレ型開先溶接が多用されるが、開先角度や底部端面などの形状に従って、十分な溶込みを確保するための溶接条件が実験的に求められたとしても、実際の施工現場においては、部材精度や施工中の溶接熱ひずみの影響から母材間にギャップが生じることが避けられない。これにより板裏面側に過大溶込みや溶落ちといった溶接欠陥が発生することがあり、自動化の妨げになるだけでなく、溶接継手性能の大事な指標である溶込み深さも同様の理由により不安定化し、品質のばらつきに繋がる。

このように溶接には解決すべき問題があるが、現象としてはアークプラズマにより母材や供給材を溶かしモノを繋いでいく物理現象であり、電気的、熱的、視覚的情報を多く発信している。場合によっては、熟練技能者はこれらを感知し、欠陥が無いように、もしくは品質が安定するように、その場で溶接を制御・調整している。冒頭に述べた自動化には、このとき何を視て何がどうなるように制御したのか、を明らかにしてセンサを選定しロボットなどに入力しなければならないが、現状、まだはっきりしたことはわかっておらず、真の溶接自動化は達成されていない。そうした観点から、カメラなどの視覚センサを用いた、画像情報による溶接のモニタリング技術が進んでいる。溶接施工中のアークプラズマや溶融池の様子と、溶込み深さなどの溶接品質の相関を見出して、プロセスの品質確保および制御につなげようとする試みである。いくつかの報告があるが、これらは限定的な利用に留まっており、例えば先に述べたようなレ型開先における溶落ちや溶込み深さといった欠陥や品質に対してのアプローチはほぼ無いのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、図1右側に示すようにカメラによる溶融池のインプロセスモニタリング情報と、外観からはわからない溶接品質との関係を深層学習によって学習させ、結果的には単一のカメラによる視覚情報を用いて、溶込み深さ推定や欠陥検出といった、溶接品質をその場で保証するシステムを構築することを目的とする。また、その判断根拠の可視化を行うことによってロボットが着目すべき特徴量を見出すこと、および推定モデルの高精度化を目指した。これらの達成により、溶接長全般に渡って安定した溶込みを得るための適用制御指針を示すことが出来ると考えられる。

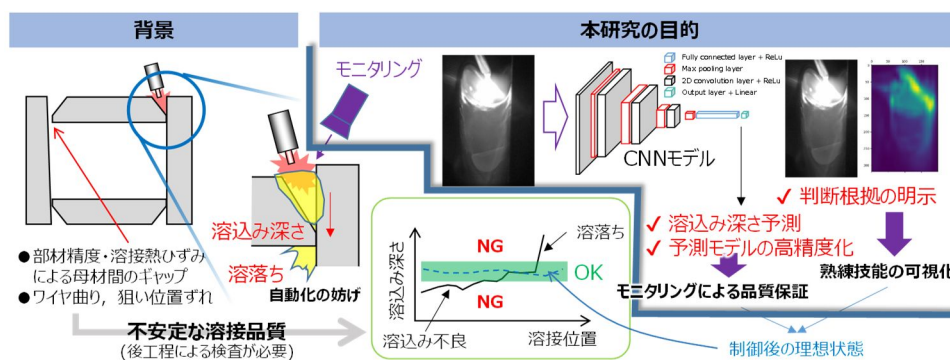


図1 本研究のコンセプト

3. 研究の方法

(1) 溶接実験

溶込み深さ推定機械学習モデルの入出力データを作成するため、本研究で用いた実験の概要を図2に示す。試験片はレ型開先溶接試験片とし、溶込みが得られるある一定の溶接条件を保持した上で、ギャップ変動の外乱を想定したいくつかのタイプの試験片に対して一定速度で溶接を行った。溶融池観察にはCMOSカメラ及びアーク光の影響を低減するため、980 nmバンドパスフィルタを用いた。各試験体の溶込み深さは、溶接線に垂直方向の断面のマクロ観察によって断片的に計測し、撮影間隔に合うよう適宜データを補間した。図3は同じ試験片形状に対する溶込み深さ変遷を示す。同様の実験条件と試験片形状で溶接した場合でも、各サンプルにおいて溶込み深さが異なる。これは、予め与えられた試験片の母材間ギャップや溶接条件以外の外乱要素が溶込み深さの形成に影響を与えていることが考えられ、溶接条件のみの情報では溶込み深さの十分な推定を行うことができないことを示している。こうした実情があるために、本研

究のようなアプローチが有用であると考えられる。

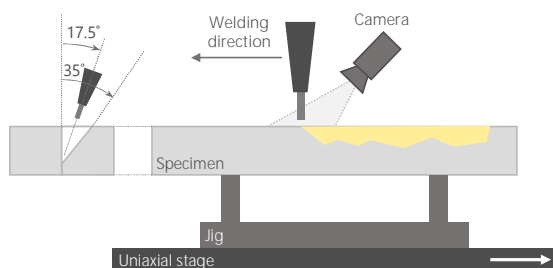


図2 実験方法概要

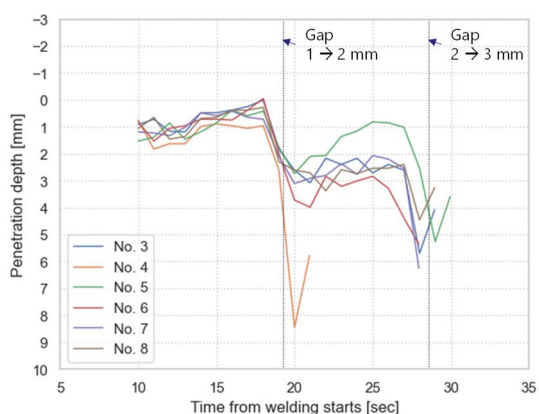


図3 溶込み深さ変遷の例

(2) データセットの作成と機械学習モデルの構築

前節で述べた実験手法によって、溶接中画像と、対応する溶込み深さのデータセットを作成した。サンプル数は28とし、1つのサンプルに対して約300~600の入出力データセットを得た。これらのデータセットから、溶融池画像を入力とした畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) による溶込み深さ推定モデルを構築した。同手法は著者らの既報に基づくものであるが¹⁾、既報よりも多くのサンプルタイプを用いて汎化性を高めている。用いた推定モデルの構造を図4に示すが、最終畳み込み層の活性化関数は溶込み深さの推定モデル(回帰モデル)では“liner”とし、可視化のためのモデル(分類モデル)では“Soft-max”とした。

判断根拠の可視化手法としては Grad-CAM++²⁾を用いた。本手法により CNN モデルでの出力判断において重要視された画像上の領域が、ヒートマップの形で示される。

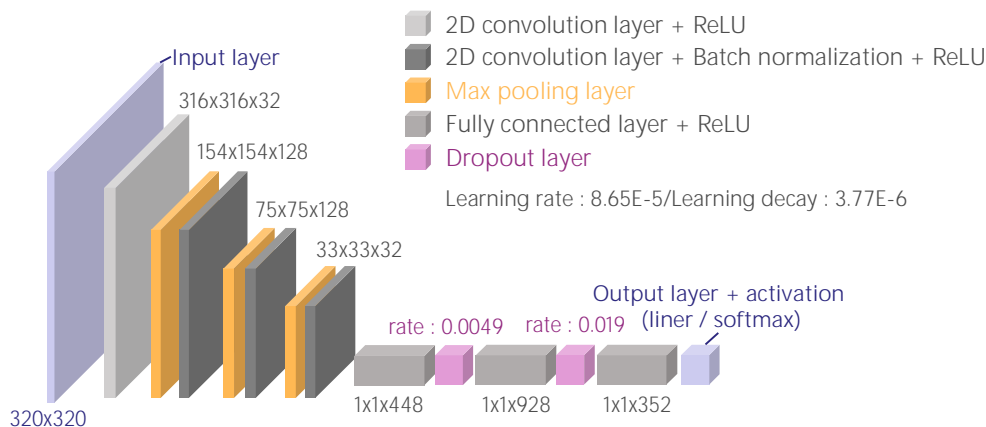


図4 判断根拠可視化のためのCNNモデル構造

4. 研究成果

構築したモデルによって行った溶込み深さ推定の結果例を図5に示す^{3,4)}。橙線は実際の溶込み深さとその線形補間データ、青線は本モデルにより推定した溶込み深さである。この例では平均絶対誤差が0.40 mm、約90%以上が1 mm以下であり精度よく推定を行うことができたと言える。図6は、溶接開始後20 secの溶融池画像と判断根拠の可視化結果である。可視化結果は、溶込み深さを図5に示すように分類し(数字が大きいほど深い溶込みとした)、あるクラスと判断した際に重要であった部分が強調され、赤色になるにしたがってその重要度が高いことを示す。ここでは、溶融池の左右端および溶接ワイヤの3点を溶込み深さ推定の判断根拠として重要視していることがわかるが、他のタイミングや条件でもほぼ同等の結果が得られた。一方で、溶融池の長さ当たりの部分は発火しておらず、本実験条件では溶込み深さ推定に重要な情報はなかったことがわかった。

この可視化結果と実際の溶接現象との関連を調べるため、得られたヒートマップを画像処理によって解析した。図7のように、可視化手法によって得られたヒートマップで同じクラスと判断したものを足し合わせて平均化画像を作成した。その後、得られた平均化画像から重要視した3領域における重心を算出した。その結果、図8に示すように溶込みが深くなるにしたがって、溶融池の左右端の重心座標は右に、溶接ワイヤを示す重心座標が下に移動していることが読み取れる。このことは、溶込み深さが深くなるにしたがって溶融池表面の高さが低下し、溶融池

の左端は右側へ移動すること、溶融池表面の高さの低下に従って、定電圧特性をもつ溶接ワイヤの突出し長さが増加したことに対応すると考えられる。一方、溶融池長さに関しては、本可視化で注目された3領域よりは明らかに重要度が低かったが、これはスラグの挙動が一因と考えている。溶融池後端部にはスラグが観察されているが、その変動は溶融池前方の動きに比べ非常に激しく溶融池長さが不明瞭になることも多かった。そのため比較的連続的に変化する溶込み深さと相関させるのが難しかったのではないかと考えている。

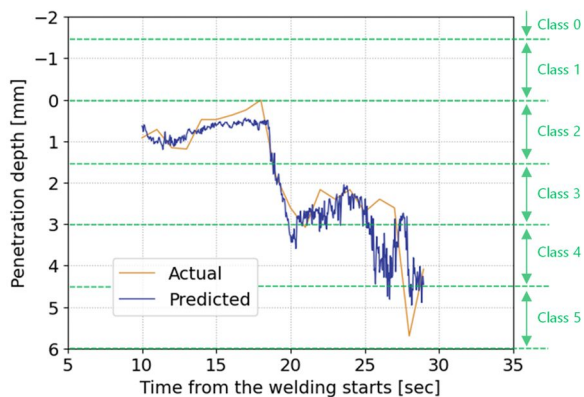


図5 溶込み深さ推定結果の例

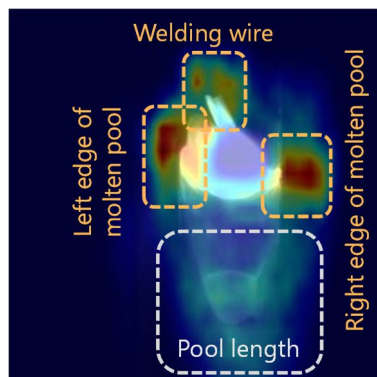


図6 判断根拠可視化の例

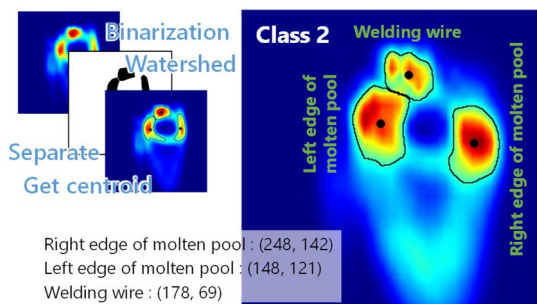


図7 可視化情報の画像解析例



図8 各クラスの可視化情報解析結果

またその他の成果として、入出力時間シフト効果がある^{5, 6)}。上記は溶接プロセス中の溶融池画像と、その直下の溶込み深さを対応させた学習であったが、溶込みが深い所では推定のずれが若干大きい。溶接現象はトーチの移動によって連続的に変化していくため、溶融池画像に対してその直下の溶込み深さを対応させるのみでは、十分に溶接現象の情報を捉えられていないのではないかと考え、CNNに入力する溶融池画像とそれに与える溶込み深さ(ラベル)の位置関係を図9のように変化させ、その影響を調査した。

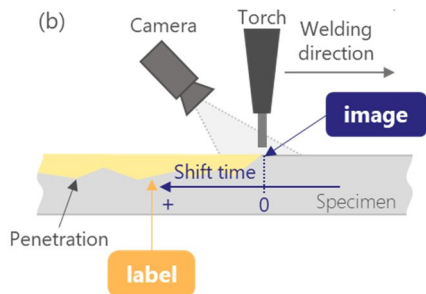


図9 入出力関係のシフト

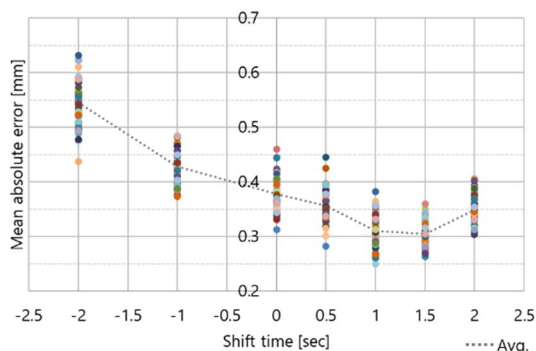


図10 推定精度へのシフトの効果

変化させたラベルの位置は、トーチから前方または後方に最大2秒分であり、トーチ前方には情報はなく、後方には溶融池が存在するため、何らかの情報が存在すると考えられる。図10は、画像とラベルの位置関係を変化させた学習を50回ずつ行った際の、各学習における平均絶対誤差をプロットしたものである。また、グラフの点線は50回の学習の平均値を結んだものである。グラフより、トーチ後方の溶込み深さを入力した際の平均絶対誤差は、トーチ直下の溶込み深さを入力した場合よりも小さくなっており、後方1秒程度で最小となることがわかった。これは、

溶接における溶込み深さを決定づける因子はトーチ直下の現象だけでなく、溶融池の形成による影響も大きいと考えられる。溶接を途中でとめ、その縦断面を観察した結果、条件によるが溶込みはトーチ後方で最大深さとなっており、これが更新されていくことで実際の溶込みとなることを考えると、このシフト効果の根拠であると言える。以上のことから、機械学習によって溶接の溶込み品質を推定する際には、実際の溶接現象に基づいた入出力の選択が重要であることが示された。

参考文献

- 1) K. Nomura, K. Fukushima, T. Matsumura, S. Asai: Burn-through prediction and weld depth estimation by deep learning model monitoring the molten pool in gas metal arc welding with gap fluctuation, *Journal of Manufacturing Processes*, 61 (2021)590-600
- 2) A. Chattopadhyay et al: Grad-CAM++: Improved Visual Explanations for Deep Convolutional Networks, *IEEE Winter Conf. on Applications of Computer Vision (WACV2018)*, (2018)
- 3) 棚原 渉, 野村 和史, 松村 匠, 佐野 智一: 機械学習を用いた溶込み深さ推定モデルにおける入力画像の時間シフト効果と溶融現象に関する考察, *溶接学会 R4 年度秋季全国大会, 溶接学会全国大会講演概要*, 111 (2022) 316-317
- 4) W. Tanahara, T. Matsumura, K. Nomura, T. Sano, S. Asai: Weld Depth Estimation and Its Visualization of Judgement Basis by CNN Model through Molten Pool Monitoring in GMAW, *Doc. No. XII-2541-2022* (2022)
- 5) K. Nomura, W. Tanahara, T. Matsumura, T. Sano: Time-shift Effects of Input Images in Weld Depth Estimation Model using CNN through Molten Pool Monitoring in GMAW, *iiw2023 Annual Assembly, Doc. No. XII-2596-2023* (2023)
- 6) 小谷 祐樹, 津山 忠久, 藤原 康平, 野村 和史, 棚原 渉: 深層学習を用いた鋼床版Uリブ溶込み深さ推定法の検討, *第 260 回溶接法研究委員会, 溶接法資料 SW-3940-23 / JIW-XII-2925-23* (2023)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 野村 和史, 松村 匠, 浅井 知	4. 巻 90
2. 論文標題 溶融池モニタリングと深層学習を用いたマグ溶接の溶込み推定手法に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 溶接学会誌	6. 最初と最後の頁 551-555
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2207/jjws.90.551	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 小谷 祐樹, 津山 忠久, 藤原 康平, 野村 和史, 棚原 渉
2. 発表標題 深層学習を用いた鋼床版Uリブ溶込み深さ推定法の検討
3. 学会等名 第260回溶接法研究委員会
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 棚原 渉, 野村 和史, 松村 匠, 佐野 智一
2. 発表標題 機械学習を用いた溶込み深さ推定モデルにおける入力画像の時間シフト効果と溶融現象に関する考察
3. 学会等名 溶接学会R4年度秋季全国大会
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 W. Tanahara, T. Matsumura, K. Nomura, T. Sano, S. Asai
2. 発表標題 Weld Depth Estimation and Its Visualization of Judgement Basis by CNN Model through Molten Pool Monitoring in GMAW
3. 学会等名 IIW2022 Annual Assembly and International Conference on Welding and Joining (国際学会)
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 野村 和史, 松村 匠, 佐野 智一
2. 発表標題 溶融池モニタリングにおける深層学習を用いた溶込み推定に関する研究 第三報
3. 学会等名 溶接学会R3年度春季全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野村 和史, 松村 匠, 棚原 歩, 佐野 智一, 浅井 知, 津山 忠久, 小谷 祐樹, 藤原 康平
2. 発表標題 溶融池モニタリングと深層学習を用いた 溶込み深さ推定法に関する研究
3. 学会等名 溶接学会第255回溶接法研究委員会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野村 和史, 松村 匠, 棚原 歩, 佐野 智一, 浅井 知
2. 発表標題 溶融池インプロセス計測×AIによる溶込み深さ推定手法に関する研究
3. 学会等名 溶接学会第239回溶接構造研究委員会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤原 康平, 津山 忠久, 小谷 祐樹, 野村 和史, 棚原 歩
2. 発表標題 深層学習を用いた鋼床版Uリブ溶接部溶込み深さ推定法の検討
3. 学会等名 溶接学会R5年度春季全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野村 和史
2. 発表標題 溶接プロセスにおけるAI活用事例と今後の展望
3. 学会等名 溶接学会R5年度秋季全国大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 太田 涼太, 野村 和史, 天野 昌春, 森 浩樹, 井村 文哉, 望月 正人
2. 発表標題 I型開先ウィーピング溶接における量み込みニューラルネットワークを用いた溶接品質推定
3. 学会等名 溶接学会R5年度秋季全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野村 和史
2. 発表標題 溶融池モニタリング画像とAIを用いた溶込み推定手法に関する研究
3. 学会等名 日本溶接協会 2023年度ロボット溶接研究委員会第3回本委員会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 K. Nomura, W. Tanahara, T. Matsumura, T. Sano
2. 発表標題 Time-shift Effects of Input Images in Weld Depth Estimation Model using CNN through Molten Pool Monitoring in GMAW
3. 学会等名 iiw2023 Annual Assembly（国際学会）
4. 発表年 2023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
---------	---------