（アルバータ大学（カナダ））　研修報告書

Artificial Intelligence (AI) in Welding Research / Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Steel

先進理工系科学研究科　機械工学プログラム　宮村 一輝

1. はじめに

アルバータ大学はカナダ・アルバータ州の州都エドモントンにある州立総合大学である．石油化学工業が盛んなアルバータ州に位置することを背景に，石油化学に関連した工学分野では世界有数の名門として知られる．

上述の産業において重要な技術として，オイルサンド等の天然資源運搬用のパイプラインの溶接や耐摩耗性向上を目的とした肉盛り溶接の技術が挙げられる．派遣先の研究室である Canadian Centre for Welding and Joining(CCWJ)は，それらの技術に対する高い需要に応えるべく設立された研究室である．

同研究室は，溶接プロセスの自動化，溶接プロセスの数値解析，冶金学の分野の研究が盛んにおこなわれており，特に溶接分野における物理現象の解明に注力している．

2. 研修/共同研究課題の決定

- Artificial Intelligence (AI) in Welding Research (溶接研究における AI)

3. 研修/共同研究スケジュール

2025 年 7 月 22 日　出国
2025 年 7 月 23 日～2025 年 8 月 24 日　共同研究実施
2025 年 8 月 26 日　帰国

4. 研修先/共同研究派遣先の概要

大学名：University of Alberta（アルバータ大学)
所在地：カナダ　アルバータ州　エドモントン
指導教員: Prof. Patricio F. Mendez

5. 研修/共同研究の内容

5.1研究背景および目的

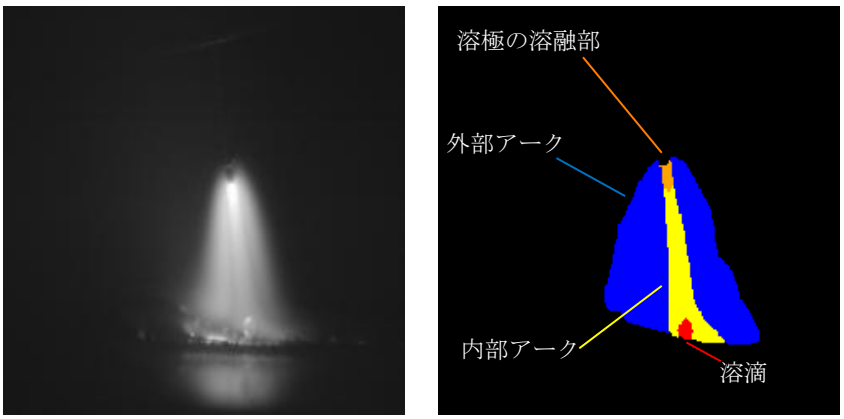
アーク溶接において，適切な電流・電圧値を選択するには技能者の感覚だよりで行われることが多い．特に溶接の分野では暗黙知の重要性は大きく，形式知化しづらいことが以前から問題として取り上げられてきた．本テーマでは高速度カメラで撮影したアルミニウムのアーク溶接映像を対象にディープラーニングによる分類を行い，画像の分類結果を基にアークの長さを推定することを目的とした．これにより，定量的に電流・電圧値とアーク長を関連づけることが可能となり，最終的に最適な溶接パラメータを体系的に決定づける助けとなる．さらには，溶接の品質向上に欠かせない，溶滴移行形態の解析にも用いることも可能であるため，機械学習の導入には大きな意義がある．

本プロジェクトは CCWJ で以前から取り組まれている課題であり，高速度カメラの映像を用いてアーク長を計測する段階までは，筆者が派遣される前からプロトタイプのソフトウェアとして達成している状態であった．しかし，このソフトウェアの使用手順にはユーザの感覚だよりの入力が要求される仕様であったため，これを自動化すべく部分的な改善を試みた．

今回使用した高速度カメラによる動画は CCWJ にて事前に撮影したアルミニウム合金板材のガスメタルアーク溶接(GMAW)である．この動画に対し，U-Net と呼ばれるニューラルネットワーク構造を用い，深層学習を行った学習モデルも既に取得されていたため，本研修では深層学習後のデータ定量化手法について検討を行った．

以降では，より詳細な研究目的について記載する．はじめに，U-Net による学習モデルを用いて

figure.1-(a)のテストデータの画像を領域分類すると，figure.1-(b)のようなフレームからなる動画が得られる．ここでは，溶極の溶融部・溶滴・内部アーク・外部アーク・その他の 5 領域に分類が行われているデータを使用した．溶極の溶融部は，溶接ワイヤの先端が溶融した状態を指す．溶滴は，溶極の溶融部がワイヤ先端から離脱したときの液滴そのものを指す．また，アークは主に金属蒸気で構成される「内部」と主にシールドガスで構成される「外部」として区別し，今回はそれぞれ内部アークおよび外部アークとして領域を分類が行われた，あらかじめ先方にて用意されていたデータを用いた．

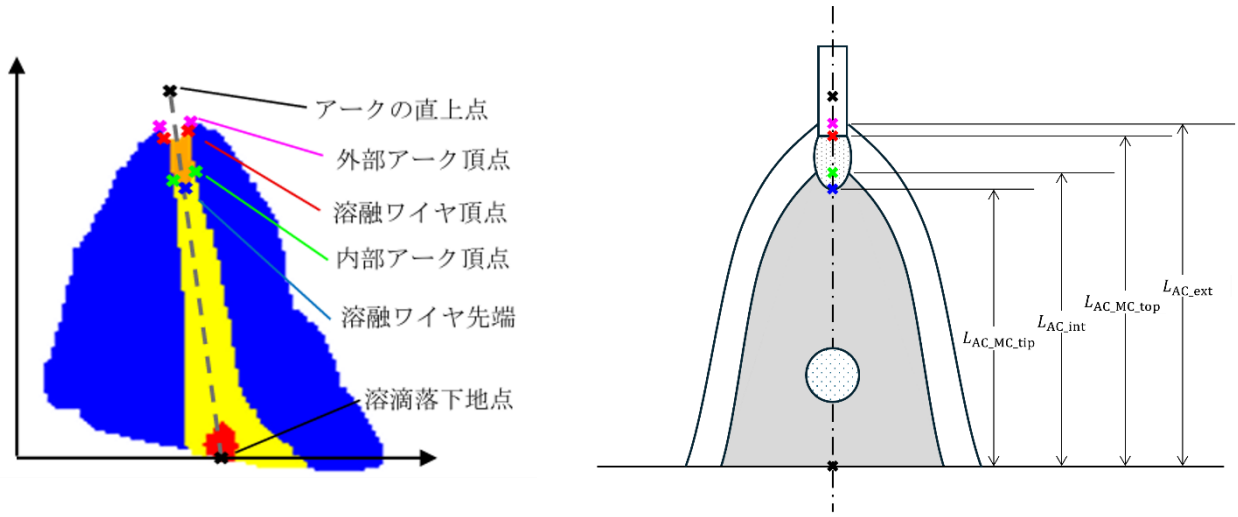


(a) テストデータ．　　(b) U-net 分類後のデータ．

Figure.1 高速度カメラで取得した画像の領域分類．

次に，以前に用いていたアーク長の計測手法を Figure.2 に示す．はじめに，Figure.1-(b)と同様の分類後の画像に対して，外部アーク頂点，溶融ワイヤ頂点，内部アーク頂点，溶融ワイヤ先端の位置を取得する．ここで，Figure.2-(a)に示すように，外部アーク頂点，溶融ワイヤ頂点，内部アーク頂点に関しては，左右で高さに違いが出ることが考えられるため，アークの中央より左側の頂点と右側の頂点を両方取得し，それら 2 点の平均値を代表値として位置を決定する手法をとってきた．しかし，以前の画像処理に用いるコードでは，溶融池落下地点およびアークの直上点を「手動」で定義し，この 2 点を通る直線により画像を分割することで左右を別々に処理することで，左右 2 点の取得を可能としていた．この手法の問題として，「手動による分割点の定義」は入力者の主観だよりであることに加え，再現性を担保することができないという欠点がある．そこで，今回の研修では，以前から用いてきた画像処理手法の一部を改変し，上に述べた，「手動」のユーザ入力による左右の分割を不要とし，自動で計測に必要な点を取得する画像処理手法を検討した．

Figure.2-(b)に計測する長さの定義を示す．はじめに，すべての計測値において溶融池の落下地点を下端部として扱う．ここから，外部アーク頂点，溶融ワイヤ頂点，内部アーク頂点，溶融ワイヤ先端の位置を取得し，左右の 2 点取得した項目に関しては，2 点の平均値を代表位置とする．これらの点を取得後，溶融池の落下地点と外部アーク頂点の y 方向距離(L_{AC_ext})，溶融池の落下地点と溶融ワイヤ頂点の y方向距離($L_{AC_MC_top}$)，溶融池の落下地点と内部アーク頂点の y方向距離(L_{AC_int})，溶融池の落下地点と溶極溶融部の y 方向距離($L_{AC_MC_tip}$)のそれぞれを取得する．計測する長さの定義に関しては，以前から用いられてきたものから変更はない．



(a) 画像処理により取得する点.　　(b) 計測する長さの定義.

Figure.2 アーク長の計測手法.

以上を研究目的とし，1 か月間の研修を行った.

5.2 研究内容

本研究では，研究背景および目的で述べた従来のアーク長計測手法に対し，ユーザが「手動」で設定していた溶融池落下地点および左右分割線の定義を自動化することを目的として，画像処理アルゴリズムの改良を行った．具体的には，

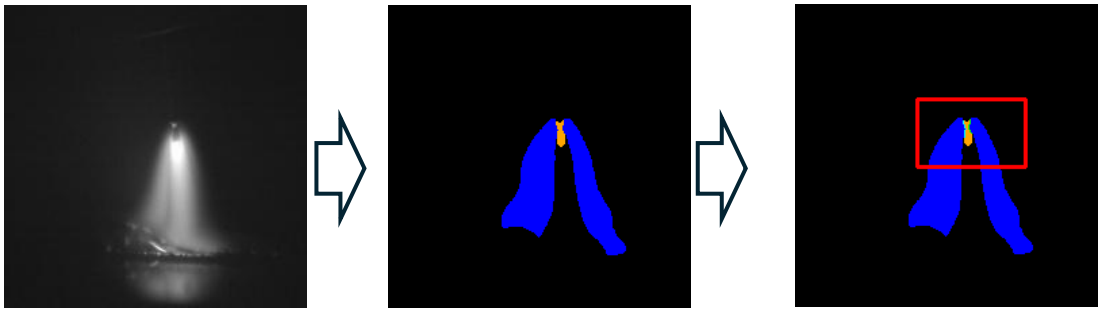
1. 溶極の溶融部および内部アーク，外部アークの頂点を自動的に左右二点として抽出する手法の構築
2. 溶融池落下地点（アーク長計測における下端基準点）の自動定義
3. それらを用いた L_{AC_ext}，$L_{AC_MC_top}$，L_{AC_int}，$L_{AC_MC_tip}$ の再計測と従来手法との比較

を行った．以下に各処理内容を示す.

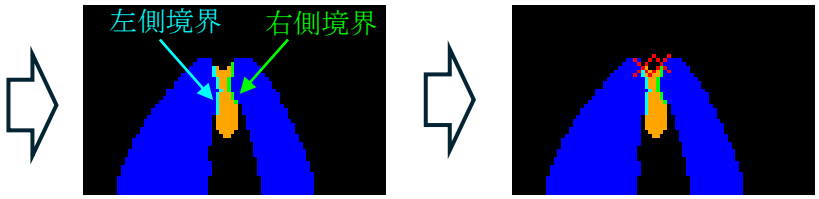
5.2.1 溶極の溶融部頂点の自動抽出

溶極の溶融部は，外部アークと隣接しており，領域内部に明瞭なくびれが存在しないため，従来は図中の左右を「手動」で分割してから高さの異なる 2 点（左側頂点・右側頂点）を取得していた．この手動に操作による左右分割を不要とするため，ここでは，クラス間境界の向きに着目した境界抽出により左右の頂点を区別する手法を用いた.

具体的な処理の流れを Figure.3 に示す．はじめに，U-Net による領域分類結果から，溶極の溶融部クラスと外部アーククラスの間に存在する境界画素を抽出し，境界の左右どちら側にどのクラスが存在するかに基づいて，境界を 2 種類に分類した．溶極の溶融部が左側，外部アークが右側に位置する境界を一方のグループとし，逆向きの境界をもう一方のグループとすることで，それぞれを「左側境界」「右側境界」として扱う．そのうえで，各グループ内で最も y 座標が小さい画素（画像上で最も高い点）を探索し，それらを溶融ワイヤ頂点の左側・右側として定義した.



(a) 元画像.　(b) 領域分類結果.　(c) クラス間境界の抽出.

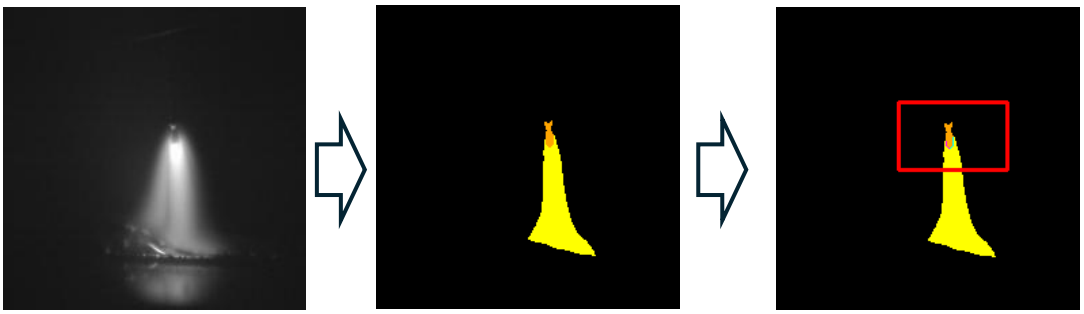


(d) 左右の境界.　(e) 左右の頂点を抽出.

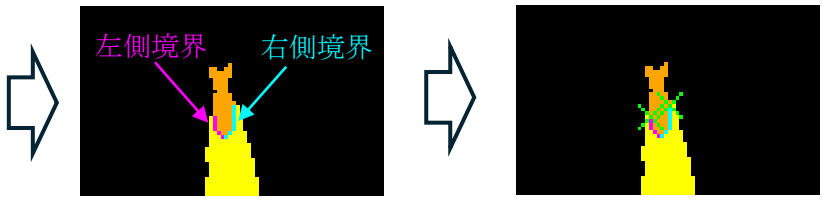
Figure.3 溶極の溶融部頂点の自動抽出手法.

5.2.2 内部アーク頂点の自動抽出

内部アークの頂点自動抽出に用いた手法を Figure.3 に示す．内部アーク頂点についても，溶極の溶融部とのクラス間境界に対し，上記と同様の「向き付きクラス間境界抽出」を適用した．すなわち，溶極の溶融部クラスと内部アーククラスの間の境界を抽出し，どちら側にどのクラスが位置するかに基づいて境界を 2 種類に分類し，各グループから最上点を求めることで，内部アークの左側頂点・右側頂点を自動的に決定した．



(a) 元画像.　(b) 領域分類結果.　(c) クラス間境界抽出.



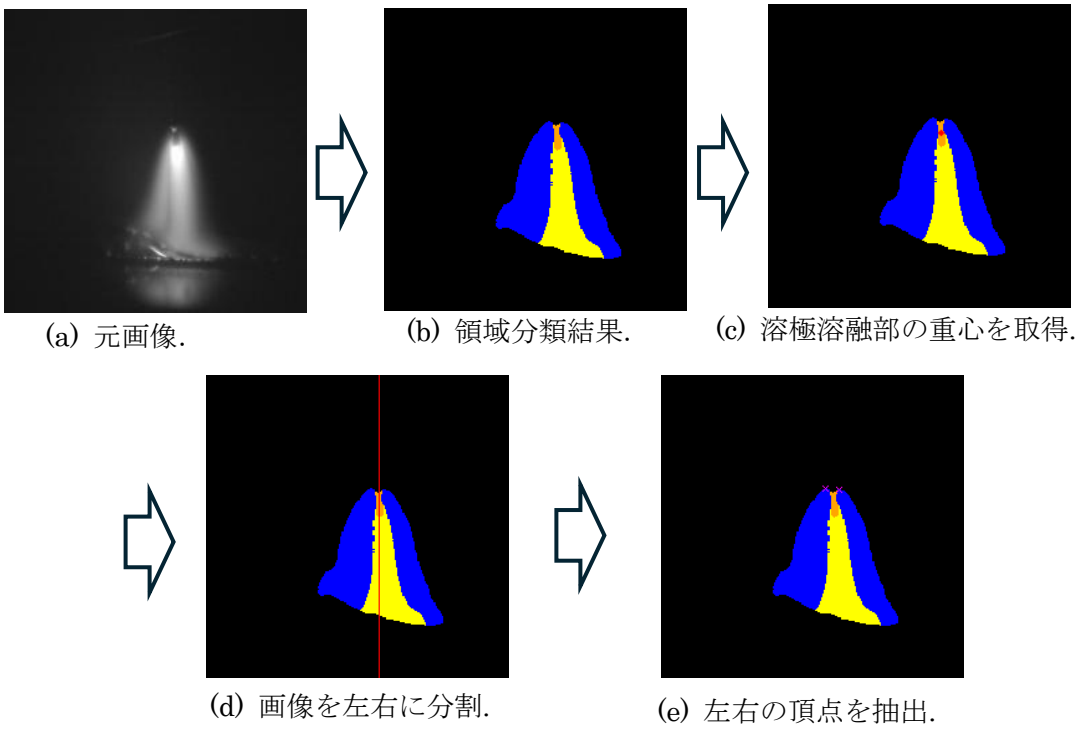
(d) 左右の境界抽出.　(e) 左右の頂点を抽出.

Figure.4 内部アークの頂点の自動抽出.

5.2.3 外部アーク頂点の自動抽出

外部アーク領域は，溶極の溶融部の周囲に明確な凹部を形成している場合が多く，左右を大まかに分けることが比較的容易である．この特徴を利用し，本研究では溶極の溶融部の重心位置を基準として外部アーク領域を左右に分割する手法を採用した．

具体的な手順について，Figure.5 に示す．まず，領域分類結果から溶極の溶融部の領域を抽出し，その重心座標を求める．次に，その x 座標を境界として外部アーク領域を左右に分割し，各側で最大連結成分（青領域の中で最大の塊）のみを残すことでノイズとなる小さな領域を除去する．最後に，各側の最大ブロブ内で最上点を探索し，それぞれを外部アーク頂点の左側・右側として定義した．



(a) 元画像.　(b) 領域分類結果.　(c) 溶極溶融部の重心を取得.

(d) 画像を左右に分割.　(e) 左右の頂点を抽出.

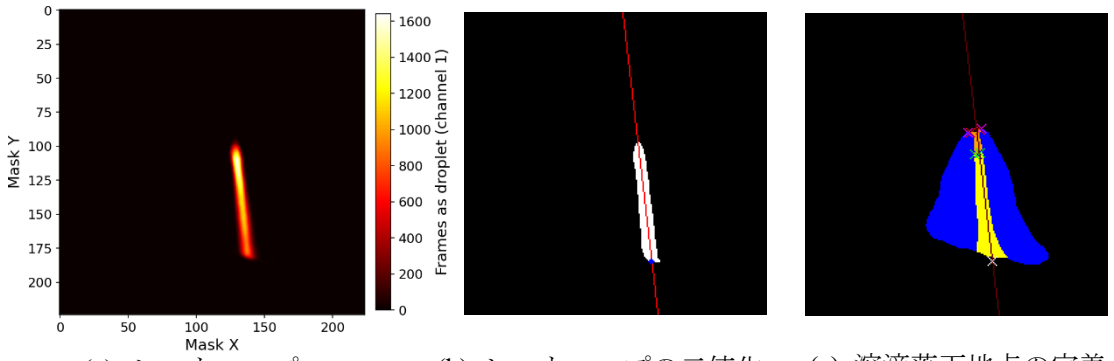
Figure.5 外部アークの頂点の自動抽出.

5.2.4 溶滴落下地点（下端の基準点）の自動定義

アーク長 L_{AC_ext}，$L_{AC_MC_top}$，L_{AC_int}，$L_{AC_MC_tip}$ は，いずれも溶融池落下地点を下端とした y 方向距離として定義されている．従来はこの溶融池落下地点をユーザが手動で指定していたが，本研究では溶滴の出現頻度に基づくヒートマップを用いてこの点を自動抽出する手法を検討した．

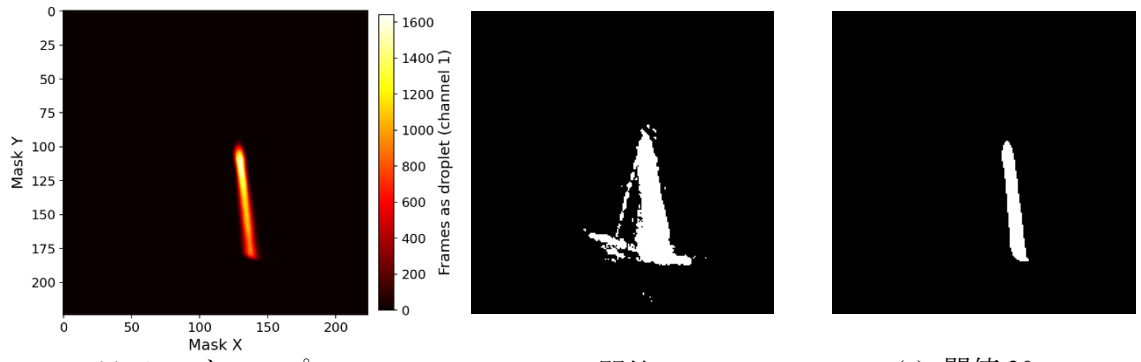
具体的には，高速度カメラ動画全フレームにわたり，溶滴クラス(赤)が各画素に出現した回数を積算することでヒートマップを作成し，これを 0-255 スケールに正規化したうえで閾値処理により二値化を行った．二値化された白画素領域は溶滴の通過頻度が高い画素を表しており，その短軸(Figure.5-(b)内の赤線)を溶滴の落下軌跡として近似した．このとき，白領域の下端は溶滴が母材表面に接触し消失する位置に対応すると考えられるため，Figure.5-(b)内に青い点で示した，白領域下端と主軸の交点を溶融池落下地点として定義した．

ヒートマップ，二値化画像，主軸および自動抽出された溶融池落下地点の例は Figure.6 に示した．また，閾値の選定に際しては，閾値 0，30，60，90，120 など複数の値で二値化を行い，溶滴軌跡の形状と白領域下端の明瞭さを比較した．ヒートマップと各閾値での二値化結果をまとめた図を Figure.7 として示し，軌跡の再現性と下端境界の明瞭さの両面から検討した結果，閾値 30 が最も適切であると判断した．



(a) ヒートマップ. (b) ヒートマップの二値化. (c) 溶滴落下地点の定義.

Figure.6 溶滴落下地点の自動定義手法.



(a) ヒートマップ. (b) 閾値 0. (c) 閾値 30.



(d) 閾値 60. (e) 閾値 90. (f) 閾値 120.

Figure.7 ヒートマップの二値化処理結果

5.2.5 従来手法との比較

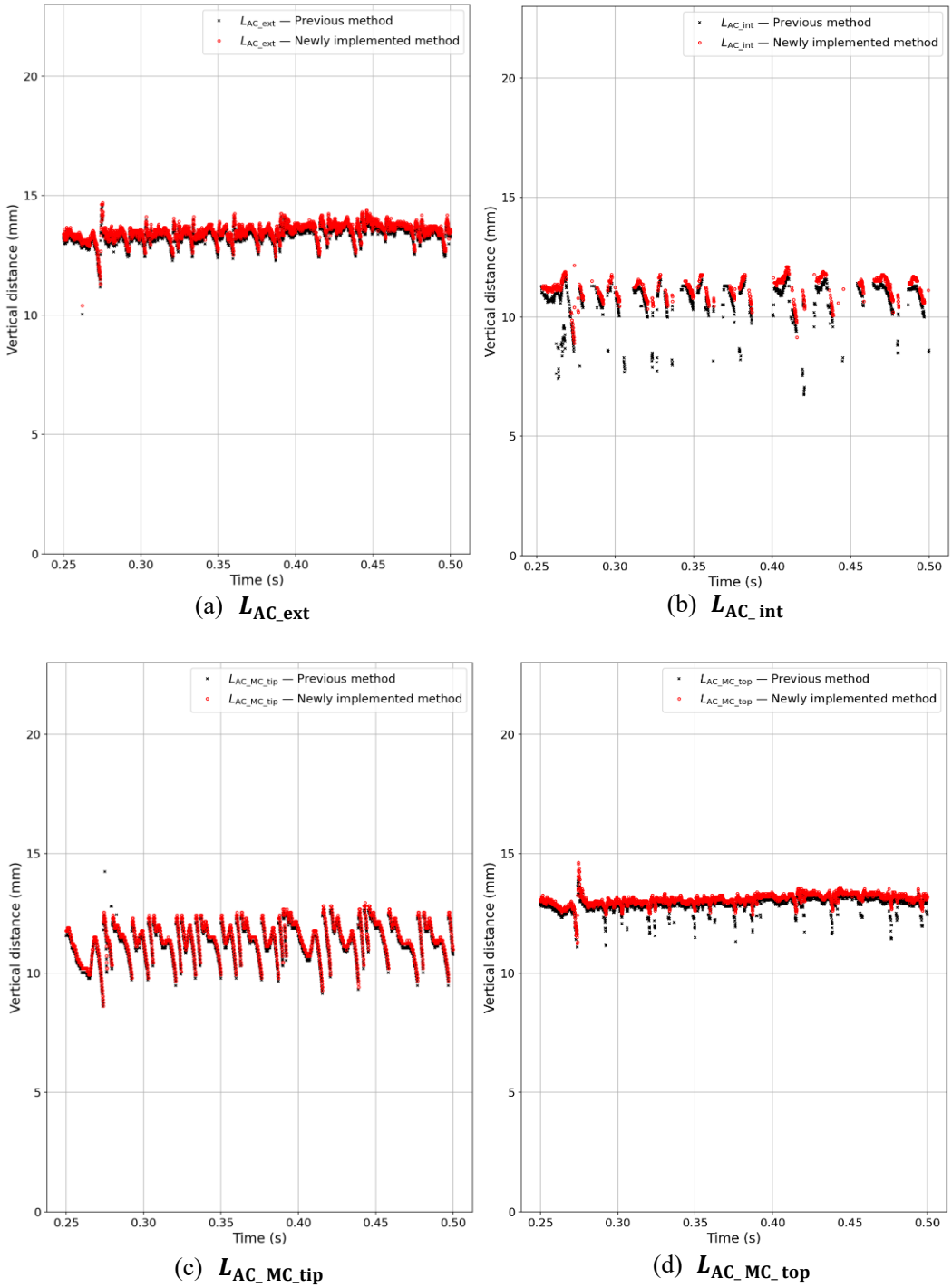
以上の自動抽出手法により得られた各頂点および溶融池落下地点を用いて，L_{AC_ext}，$L_{AC_MC_top}$，L_{AC_int}，$L_{AC_MC_tip}$ を再計測（赤プロット）し，従来の手動定義（黒プロット）に基づく結果と比較した．結果の一例を Figure.8 に示す．なお，縦軸は既知の補正係数（高速度撮影を行った際に算出したもの）により，mm 単位に変換を行った．

L_{AC_ext} および $L_{AC_MC_top}$ については，従来手法と本手法の時系列プロットの傾向がよく一致しており，全体として小さなオフセット差が生じる程度であった．このオフセットに関しては，両手法とも外部アーク頂点および溶融ワイヤ頂点の抽出処理が類似している一方で，下端基準となる溶融池落下地点の y 位置がわずかに異なることに起因すると考えられる．

一方，L_{AC_int} および $L_{AC_MC_tip}$ では，波形の変動幅や谷部の深さに差異が見られ，従来手法の方が

値の変化を大きく表現する傾向があった．これは，従来手法における左右分割線の「手動」設定が，内部アークや溶極の溶融部の頂点位置を過大に評価している可能性，あるいは本研究で提案した自動抽出手法が変動をやや抑え気味に評価している可能性が考えられる．

なお，従来手法では動画ごとにユーザが分割線および溶融池落下地点を主観的に設定する必要があるため，動画間で基準が揃わないおそれがある．これに対して，本研究で構築した手法は，領域分類結果と溶滴出現頻度の情報のみに基づいて，全フレームに対して一貫した基準で特徴点を自動定義できるため，アーク長の定量化における再現性向上に寄与すると考えられる．



(a) L_{AC_ext}　(b) L_{AC_int}

(c) $L_{AC_MC_tip}$　(d) $L_{AC_MC_top}$

Figure.8 以前の手法と今回の手法の測定結果比較

6. まとめ

本研究では，高速度カメラを用いた溶接映像に対し，学習済みの U-net モデルを使用して領域分類を行ったデータを基に，アーク長の解析を自動で行うプログラムを作成した．なお，使用する元データと基礎となるプログラムに関しては CCWJ にて作成済みであったため，それを基に研究を行った．今回の研究で，プログラムの一部を自動化して得た計測結果と，以前の計測結果を比較したところ，大まかな傾向は類似していたが，L_{AC_int} および $L_{AC_MC_tip}$ において計測結果に差異が見られ，この差異が生じた原因の特定には，本手法と以前までの手法の厳密な比較が必要であると考える．L_{AC_ext} および $L_{AC_MC_top}$ については，従来手法と本手法の時系列プロットの傾向がよく一致しており，全体として小さなオフセット差が生じる程度であった．このオフセットに関しては，両手法とも外部アーク頂点および溶融ワイヤ頂点の抽出処理が類似している一方で，下端基準となる溶融池落下地点の y 位置がわずかに異なることに起因すると考えられる．本手法を採用すると，全フレームに対して一貫した基準で特徴点を自動定義できるため，アーク長の定量化における再現性向上に寄与すると考えられる．

7. 謝辞

本研究を行うにあたり貴重なご意見をいただいた Patricio Mendez 教授，受け入れの準備を行ってくださった Larysa Hodder 様，現地での生活や研究を支えてくださった Lucas Taipe 様，Mia Abdulla 様をはじめ， CCWJ の皆様にお礼申し上げます．また，このような貴重な機会を与えてくださった広島大学 先進理工系科学研究科　山本元道教授に厚くお礼申し上げます．最後に，海外共同研究プログラムをサポートしていただきました実行委員会の諸先生をはじめとする学生支援グループ国際事業担当の皆様に心よりお礼申し上げます．