計測自動制御学会東北支部第195回研究集会(2001.6.22)
資料番号195-2

画像処理を利用した溶接スキルの特徴抽出

Experimental Study on the Feature Extraction for Skill Welding

○原田友和*、佐久間正剛**、高橋信*、北村正晴*
Harada Tomokazu*、Sakuma Masatake**、Takahashi Makoto*、Kitamura Masaharu*

*東北大学　**㈱東芝
*Tohoku University　**Toshiba Corporation

要約：原子力プラントの安全性を維持するにあたり手溶接作業は非常に重要な役割を担っており、その信頼性は作業者の技量に大きく依存する。そこで本研究では、手溶接技能の定量化を目指し、施工中検査の際に得られる画像と熟練度とを結びつける画像処理手法についての検討を行った。

キーワード：熟練技能 (Skill of Expert)、技能伝承 (Tradition of Skill)、訓練支援 (Support for Training)、品質管理 (Quality Control)、画像処理 (Image Processing)

連絡先：〒980-8579　仙台市青葉区荒巻字青葉 01 東北大学大学院　工学研究科　量子エネルギー工学専攻　北村研究室　原田友和,　Tel/Fax(022)217-7907, E-mail:harada@luke.qse.tohoku.ac.jp

1. 緒言

原子力プラントの安全性は多くの諸技術に支えられており、今後はこれらの技術の維持・伝承が望まれている。　このような諸技術には相対的に精神性が多くを占める分野と身体性が多くを占める分野とが存在すると考えられる。　本研究では、後者に属すると考えられる手溶接施工技術に着目する。　近年では定型的な溶接作業の多くが自動化あるいは半自動化されているが、自動化の困難な部位の多くは依然手溶接による施工が行われている[1]。　特に、原子力プラント等における多品種少量生産分野では溶接作業の自動化率が低く[2]手溶接作業に高い信頼性が求められる。一方、高度な熟練技能を有する技術者は年々減少しており[3]、溶接品質管理、訓練支援等による熟練技能伝承の重要性が広く認識されるようになってきている。　本研究では熟練技能の継承支援ならびに、溶接品質管理を視野に入れ、その第一段階として手溶接のプラントの施工・補修における計測結果と熟練度とを結びつけるための画像処理手法を提案し、その検証を行った。

2. 手法

2-1 試験・解析手法

本研究では、手溶接施工中監視に向けた溶接士の施工状態（溶融部）を計測する試験において記録された画像データを利用して、そこから溶接スキルに関連する特徴量をオンラインで抽出する画像処理手法について検討を行った。計測試験の様子を図1に、記録された画像データの例を図2に示す。　この計測試験は、技量の異なる3名の溶接士(熟練溶接士、認定溶接士、溶接初心者)によるV開先突合わせ試験片の下向き初層TIG溶接施工作業の施工中プロセス計測である。　溶接施工の難易度を変えるため電流値を100A(通常より低い)140A（通常)、160A（通常より高い）の3ケー

スについてCCDカメラによる計測を行い、得られた画像から解析を行った。　ここで得られた画像を処理し、特徴量の抽出と解析を行った。　今回用いた特徴量は、トーチ先端位置、トーチローリング角度、両開先線角度である。これらの特徴量をそれぞれ図3-1、図3-2、図3-3に示す。これら3種類の特徴量からトーチの移動方向の動きを除く三次元的な全ての動きを捉えることが出来ると考えた。画像処理手法の概要については2-2で述べる。溶接作業は周期的な運動により行われるので、得られた特徴量データは周期波形となる。実際に得られたデータを図4に示す。　本研究ではこの波形の振幅と周期の大きさと安定性について解析を行った。　これら振幅と周期のそれぞれに対して平均と分散を取り、安定性について定量的に評価を行った。

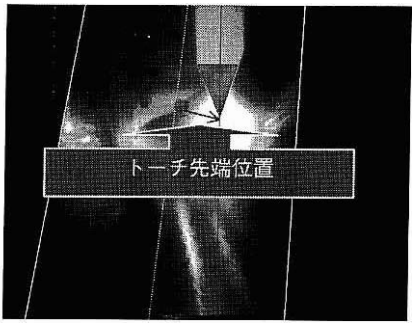

図3-1:トーチ先端位置

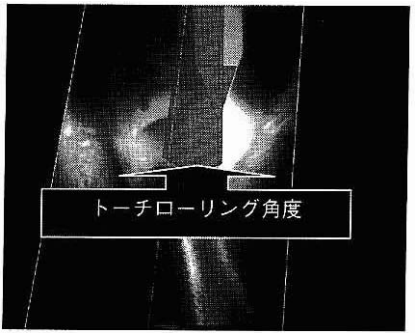

図3-2:トーチローリング角度

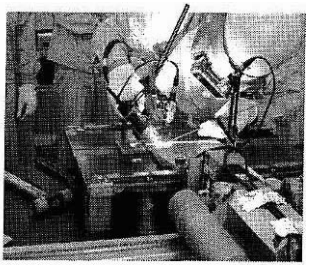

図1:計測中の様子

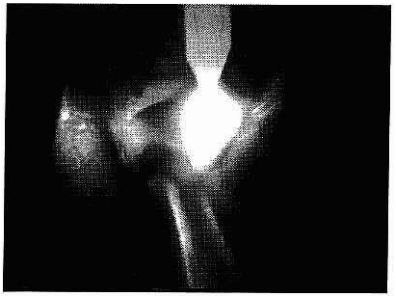

図2:計測試験により得られた画像データ

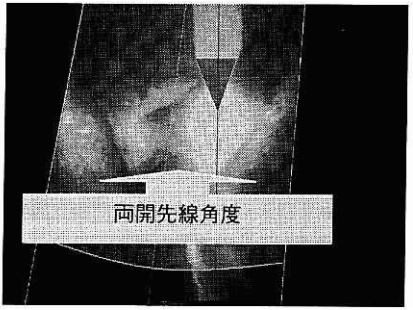

図3-3:両開先線角度

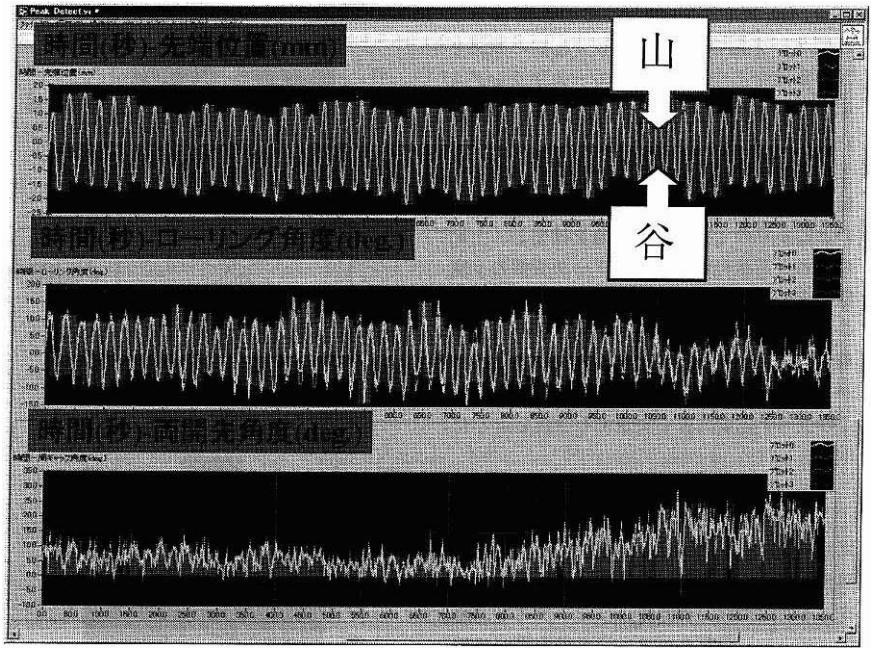

図4:実際に得られた波形データ

2-2 画像処理手法

計測された画像データからの特徴量の抽出は次の①から⑥の段階を追って行った。

① 動画の取り込みと静止画への変換
② 画像情報の配列化
③ トーチ先端位置の決定
④ 画像の前処理
⑤ 両開先線エッジ抽出
⑥ 開先線、中心線の抽出

① 動画の取り込みと静止画への変換

まず、トーチ先端のCCDカメラで撮影された画像をAVI形式でPCに取り込む。今回は一回の施工試験において施工状態の最も安定すると見られる部分を目視により確認し、約一分間のデータを取り出しPCに取り込んだ。

次に、取り込んだ動画を、1秒間に30フレームでBMP形式の静止画に変換した。ここで、本研究での特徴量抽出にはカラー情報は不要であると考え256階調のグレースケール(明るさのみで画像情報を表し、最小が0最大が255)で静止画に変換した。

② 画像情報の配列化

①で得られた静止画の1フレーム、1フレームに対して、その画像情報つまり、画素値と座標との関係を、y座標を行、x座標を列として二次元配列に格納する。この様にして格納した画像情報と配列の行と列との関係を図に示す。

③ トーチ先端位置の決定

配列に格納した画像情報から、まず初めに画素値が255、つまり視覚的には最も明るくなるアーク光の部分が含まれると考えられるy(行)=240のところでの1行分の画素値を抽出する(1)。次にx座標とその画素値との関

係をグラフに示す(2)。そこで、画素値が255(アーク光の部分)になるx座標の範囲を求める(3)。この操作を全フレーム中ランダムに100フレーム取り出してきて行い、画素値が255となる範囲(アーク光の大きさ)が最小となるときの範囲の中心のx座標をトーチ先端のx座標とする(4)。次にこのx座標（列）のところでの1列分の画素値を抽出し、上記のことと同様の処理を行いトーチ先端のy座標を求める。

この様な操作でトーチ先端位置を決定した結果、目視によりほぼその位置と思われる位置がとれることが確認された。

このトーチ先端位置を決定する過程を図6に示す。

④　画像の前処理

両開先線エッジを抽出する前に、不必要な情報を削除するため画像に対して前処理をかける。本研究では、明るさ、コントラスト、ガンマ補正の三種類のパラメータ値を用いて両開先のエッジ部分が視覚的に明確になるように処理画像を補正する。最初にコントラストを調整し、次に必要な情報が消えないように明るさの調整とガンマ補正を行う。左右の開先線で明るさ等が異なることから、同じ処理をしたのでは片方のエッジが明確に見えていても、もう片方のエッジは消えてしまうことがあったので、③で決定したトーチ先端位置の左右それぞれに対して別々の処理をかけるようにした。この様な処理をしてもノイズが残る場合もあったので、更にLow Pass Filterをかけノイズを除去した。この前処理以前の画像と前処理後の画像を図7に示す。

二次元配列

図5:画像情報と配列（行と列）の関係

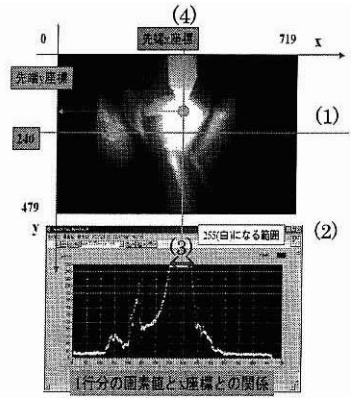

図6:トーチ先端位置決定の過程

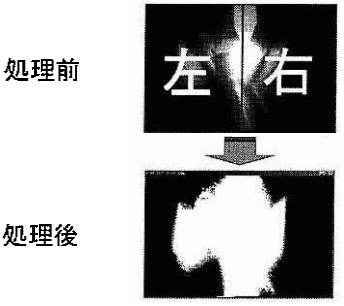

図7:前処理前と前処理後の画像

⑤　両開先線エッジ抽出

④の前処理終了後、両開先線のエッジを抽出する。最初に、着目する両開先線の概ねの位置は分かっているので、それに対応するようにエッジ抽出範囲(行)を決定する(1)。次に、その範囲内で、ある一行分の画素値とｘ座標との関係を抽出する(2)。そこで、ｘ座標が0の所から左から右に見ていって最初に画素値が1から255となるｘ座標（255要素）を求める(3)。その255要素のｘ座標の中央値をエッジ位置とする(4)。つまり、1行分だけ見て明るさが変わり始める所から、それが終わる所までの中央の値をエッジ位置とすることにした。

前処理を施したこともあり、目視でエッジ部分と一致することが確認された。右側のエッジに関しては、右側のエッジの抽出範囲を別に決定し、その一行分の画素値とｘ座標との関係をいったん反転させ、エッジを求め、それを更に反転させることによりエッジのｘ座標を決定する(5)。この両開先線エッジを抽出する際の過程を図8に示す。

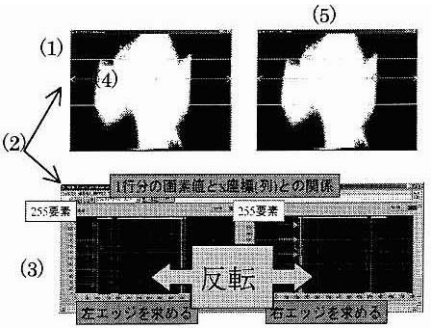

図8:両開先エッジ抽出過程

⑥　開先線、開先中心線の抽出

⑤で抽出されたエッジを抽出範囲内の行、全てに対して求め、それらに対して最小自乗法を用いて近似曲線をひくことでそれを開先線とする。この様にして決定した二本の開先線の中心線を求め、それを開先中心線とみなす。この抽出の様子を図9に示す。

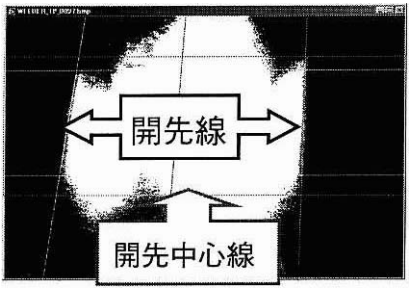

図9:両開先エッジ及び開先中心線

①から⑥の様にして求めたトーチ先端位置、両開先線、中心線からこの章の初めに述べた三種類の特徴量を抽出した。この抽出が正確に行われているか監視する為に、抽出の際には図10に示すような監視画面を用いた。

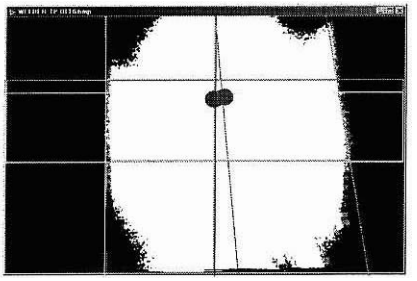
図10:特徴量抽出の際の監視画面

3. 結果

解析したデータのうち、トーチ先端位置に関する振幅の平均データを図 11 に、振幅の分散データを図 12 に示す。

また、周期の平均データを図 13 に、周期の分散データを図 14 に示す。

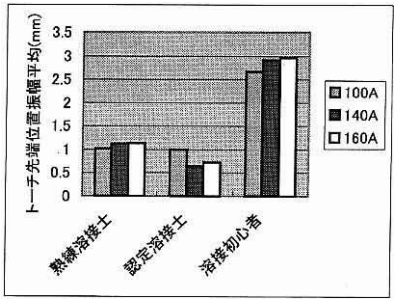

図 11:トーチ先端位置振幅平均

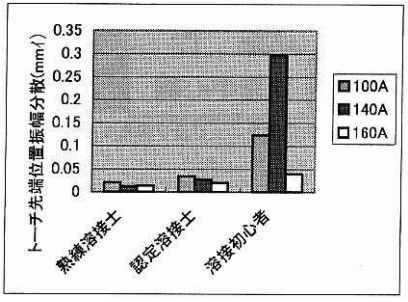

図 12:トーチ先端位置振幅分散

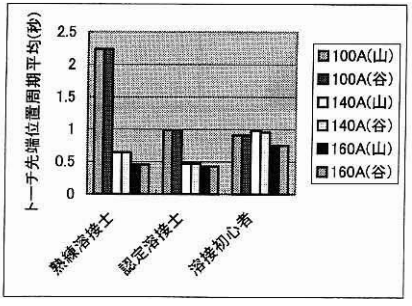

図 13:トーチ先端位置周期平均（山と谷）

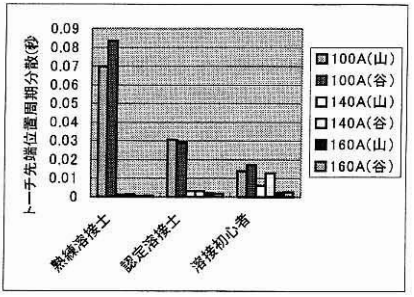

図 14:トーチ先端位置周期分散（山と谷）

図 11 から熟練溶接士の振幅は電流値に依らずほぼ一定の値（1mm）をとっている。これに対し、認定溶接士の振幅は熟練者に比べ小さいが、電流値による変動はやや大きい。溶接初心者に関しては振幅が熟練者の約三倍程度とかなり大きな値になっている。

図 12 から熟練溶接士のトーチ先端の動きは非常に安定していることが示されている。これに対し、認定溶接士の安定度は比較的高いものの熟練溶接士と比較すると、ばらつきが大きい。また、溶接初心者は、基本的に不安定であり、その不安定の度合いも電流値によって大きく異なっているということが示されている。

図 13 から熟練溶接士は、電流値が小さい場合は運棒周期を大きく（緩やかにトーチ先端を動かす）、電流値が大きい場合は運棒周期を小さく（速やかにトーチ先端を動かす）することにより、電流値の変化という条件変化に対処している事が分かる。認定溶接士に関しては、周期変更はなされているものの、熟練者と比較すると周期変更の度合いは小さいものである。これらに対し、溶接初心者に関しては、電流値が変化した場合も周期がほぼ一定であることから、条件の変化に対して適応的な対処が出来ていないということが示されている。

図 14 から熟練溶接士は基本的にほぼ一定の周期で施工作業を行っているものの、電流値が 100A の時に限り極端に不安定な周期であることが示されている。認定溶接士に関しても同様の傾向が観察される。溶接初心者に関しては基本的に不安定であるが、電流値 100A に限って比較すると、周期性の安定度は一番高い。

図 14（周期の安定性）から得られた結果は次の様に解釈することが可能である。
基本的に熟練者ほど高い電流値での作業が可能である。電流値が高いほど入熱量が多いため、速やかに作業を進めることが出来るが、これは初心者にとっては困難な作業となる。従って、熟練者はそれぞれに自分なりの適正な電流値を持ち、これが比較的高い値となっている。この試験における 100A という電流値は、熟練者にとってかなり低い電流値であり、普段の施工作業中の電流値とは大きく異なる値である。この様なことから、試験時も「やりにくい」という意見が聞かれ、その結果として周期性の安定度が低下したものと考えられる。

尚、トーチローリング角度や開先線角度についても同様の傾向が見られた。

以上のことをまとめると次のようになる。

熟練溶接士
- 振幅｛トーチの動き（先端位置、角度)｝は条件によらず一定である。
- 周期は条件（電流値）に応じて変更して対応している。

認定溶接士
- 振幅｛トーチの動き（先端位置、角度)｝は熟練者より小さく、条件により多少のばらつきがある。
- 条件に応じた周期変更も熟練者より小さい。

溶接初心者
- 振幅｛トーチの動き（先端位置、角度)｝が明らかに（他の溶接士と比較して）大きく安定性にも欠ける。
- 条件に応じた周期変更は全く見られない。

このように、本研究で提案した画像処理手法により、手溶接の施工中検査において得られた画像から特徴量を抽出し、そこから熟練度の定量的な評価が可能であることが確認された。

4. 結論

手溶接の施工中検査で、トーチ先端に固定した CCD カメラからの画像を処理して得られた指標において、熟練溶接士と認定溶接士及び溶接初心者では定量的に明確な違いが認められ、熟練度の定量的な評価が可能であることを確認した。
今後は、今回の試験で用いた試験片に対し非破壊検査として UT 検査を行い、それから破壊検査を行うことでスキル評価値と溶接の品質に関しての関係を検討していく予定である。

参考文献

[1] 溶接法研究委員会編：溶接法ガイドブック 3「アーク溶接の自動化技術」, 1995.
[2] 杉谷：「センサが溶接自動化を切り開く」, 溶接技術, Vol.46, No.5, 1998.
[3] 安田：「溶接技術者の育成と課題」, 溶接技術, Vol.46, No.1, 1998.