

技能継承を指向した溶接技能解析の研究

A Study of Welding Skill Analysis Aimed for the Skill Succession

松浦 慶総¹ 高田 一¹

Yoshifusa Matsuura¹, Hajime Takada¹

¹ 横浜国立大学

¹ Yokohama National University

Abstract: In late years the succession of the expert skill becomes the social problem. Therefore, quantification and database compilation of skill motion, the development of the education support system are extremely important for accumulation and the education of the skill. Then we intended for the arc welding skill in this study. The system which we developed evaluates the three-dimensional motion information that we acquired by the motion capture system based on the judgment standard of the expert skill person quantitatively.

1. はじめに

現在、日本の製造業ではこれまでものづくりで重要な役割を果たしてきた熟練技能者の高齢化、若者の製造業離れによる後継者不足にともなう製造技術・技能の継承問題が深刻化している。特に団塊世代が2007年以降に大量退職する「2007年問題」は、少子化問題と併せて日本の産業、特に工業に大きな影響を与えているといわれており^[1]、早急な対策が必要となっている。

しかし、従来の教育システムはOJT (On the Job Training) などの熟練者が生産現場で若手を直接指導する手法が主流であり、教育に時間と手間がかかる、若手のモチベーションの維持が困難である、熟練者自身が教育者でないため熟練者ごとに指導のポイントが異なり、効果的かつ適切な教育指導を十分に行うことが難しいといった問題がある。最近では大手企業で技術・技能教育のための制度やマニュアル作りを進めているが、ものづくりの中心である中小企業では、時間も人材も手配できないためほとんど対策ができず、製造技術や技能の保存技術とその教育支援システムの開発が強く望まれている。

本研究では溶接技能のうち、溶接実技に関する技能動作を対象とする。溶接は溶接過程での品質判定や製品での破壊検査が困難といったことから、製造工程において「特殊工程」と呼ばれている。例えば原子力発電所の配管溶接の場合であり、実際に溶接作業を行う技能者の高度な技能レベルが要求される。この技能動作の習熟にはプロセス情報が重要であるが、熟練技能者の定性的評価に大きく依存している。

また、熟練技能者ごとに指導するポイントが違ったり、習熟プロセスの構造が未解明なため試行錯誤することが多かりし、未習熟者が戸惑い、また習熟に時間がかかってしまう。

したがって、技能プロセス情報や技能レベルを定量化し、それらを基にした教授システムの開発がきわめて重要である。また熟練技能者が無意識で行っている溶接作業において、品質を左右するポイント、また技能向上のためのコツといった、これまで「暗黙知」として作業経験のみで獲得していた知識を構造化し、誰もが理解できる表現手法で提示する、「暗黙知の可視化」が必要である。これにより、学習過程において未習熟者が動作の注視点を認識し、同時に熟練技能者が未習熟者の学習状況を把握することが可能となる。

そこで本研究では、まず技能動作教育において従来のシステムの教育プロセスについて考察をし、技能教育における教師と学習者のコミュニケーションについて検討する。さらに今回は溶接技能を研究対象としているため、溶接技能動作の特徴を考慮しながら、品質工学手法の一つであるTS法 (T法 (3))^[2]を用いた動作判定システムの説明を行う。

2. 技能動作 (身体知) 教育のプロセス

技能動作における教育システムとして、徒弟制度やOJTが用いられている。徒弟制度は師匠と弟子の関係から成り立っており、師匠が明示的に弟子を指

導することはあまりなく、いわゆる師匠の「技を盗む」ことで技能を習熟する。ここで、徒弟制度における教育のプロセスを考えてみると、弟子になると雑用を含め、誰もができる作業から始める。その後、習熟度の向上に伴い難易度の高い作業に移行していくが、分担する作業は技能教育とは全く関係なく、実務上の分担によるものであるため、習熟に非常に時間がかかる作業も存在する。また習熟の際には兄弟子が教授役を務めることが多いが、実務執行が主であり、弟子は実務中の観察や兄弟子の指導により学習する。したがって、習熟プロセスは「修行」であり、学習者のモチベーションに大きく依存する。

一方、OJT は一般的に企業の研修でよく用いられており、実際の職務を通して技能を習得する教育である。OJT では通常、上司などが教師役となって基礎研修では得ることができないその職場の知識を、実務を通じて教育するシステムである。一見すると徒弟制度に似ているが、OJT では明確に教育を目的としており、そのために業務の選定や習熟度の評価、教授者と学習者とのコミュニケーションを実施している。しかし、教授者である上司は OJT のための教育を受けていることはほとんどないため、学習者が今どこを意識しているか、どのようなアドバイスで解決するか、モチベーションの維持など、学習者の状況に合わせた指導をすることが難しい。

ではなぜ現在も技能教育のほとんどがこの徒弟制度や OJT を用いているかを考えると、技能動作の知識の多くが暗黙知であり、暗黙知の教育・学習手段がほとんどないからである。一般的に技能教育の初期の段階では、基本的な動作や注意点、評価のポイント等の指導があるが、そのあとは教授者の挙動を観察し、それらの意図を考えながら、真似をし、繰り返し学習をする。また、教授者である熟練技能者は教育者ではないため、現在の学習者の意識やイメージを想定したり、習熟度に適した指導をしたりすることが難しい。したがって、教授者と学習者との意識の相違が生じ、教育効果が得られないことがあると考えられる。

3. 技能動作教育におけるコミュニケーション

2章で述べたように、徒弟制度や OJT では熟練技能者が教授者として指導しているが、指導のための教育を受けていることはほとんどない。したがって、熟練技能者の経験と指導の試行錯誤に依存した教育となり、場合によっては指導の基準がぶれてしまい、習熟効果に大きく影響することも考えられる。また、

技能動作の知識や情報も、これまでの教育法では技能の難易で分類した作業を順次習得させているが、教育の観点から構造化されたものではない。さらに、この知識の伝達は学習者が真似ることを基本としており、一方向伝達である。また、表現手段も多様ではないため、指導の意図を学習者に理解させることが難しく、したがって指導が試行錯誤になりやすい。

したがって、教授者と学習者との双方向コミュニケーションでは、(1) 技能動作の構造化、(2) 意識の明確化が非常に重要と考える。

(1) 技能動作の構造化

技能動作の構造化とは、技能動作の教育を考慮してどのような習得プロセスを実施すればよいかを構造化することを意味する。基本的には現在行われている技能作業の難易の分類になるが、習熟のプロセスはシーケンシャル型ではなく、スパイラル型であると考え(図1, 2)。シーケンシャル型はこれまでの教育システムの考え方で、技能の難易で分類された作業を順次習得していくと、それに伴い技能も向上するというプロセスである。しかし、分類された作業の中にもさらに幾つもの技能があり、またある程度の習熟度に到達すると、一時的に停滞し、あるきっかけで飛躍的に習熟度が亢進するという事象が多い。したがって、作業とは別に同レベル、もしくは一段進むのに必要な技能動作を階層的に配置し、それらの習熟が進んだ段階で、別の視点、意識を持たせることで習熟度の亢進を促すスパイラル型のモデルを構築する必要がある。

(2) 意識の明確化

意識の明確化では、技能で重要な身体動作において何を意識する必要があるか、または現在何を意識して学習をしているのか、この動作はどのような意図があるかを明確化し、教授者、学習者でイメージの共有を実現する。

身体技能では身体の部位の使い方に大きく依存するので、

- (a) 身体部位の位置
- (b) 身体部位の時間的変動
- (c) 身体部位の筋活動
- (d) 技能動作の結果

に分類をして、両者がどのような意識をしているか、またあるレベルの技能習熟にはどのような意識が必要かを双方に明示することで、習熟効果が期待できる(図3)。

従来の教育システムでは学習者側に多大な労力がかかる割に十分な効果が得られない可能性があるといった問題点があったが、本研究で提案したスパイラル構造や意識の明確化によって技能情報の共有が実現でき、効果的な教育が可能になると考える。

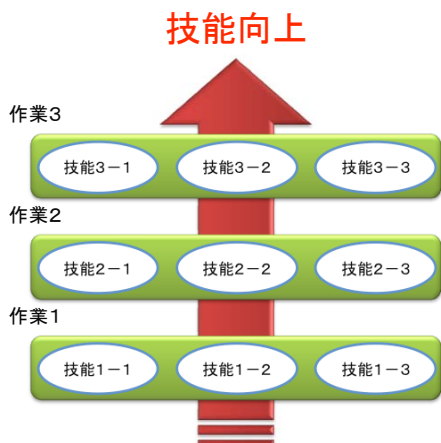


図1 シーケンシャル型

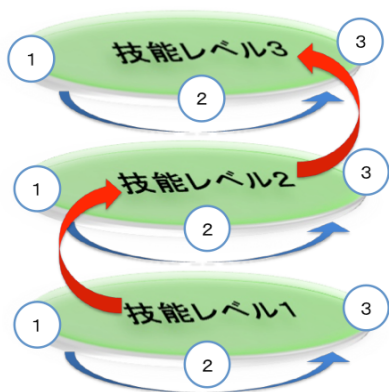


図2 スパイラル型

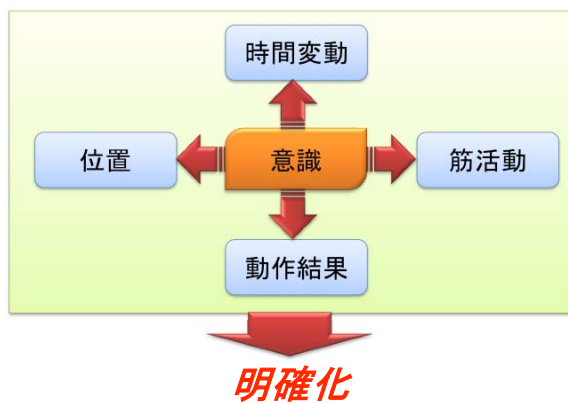


図3 意識の明確化

4. RT法(T法(3))による類型化

本システムで使用しているRT法(T法(3))は品質工学の良・不良品判定手法のMT法の一手法である。RT法では、良品群の測定データから単位空間を設定し、判定する測定データと単位空間とのマハラノビス距離を求めることで良品判別を行う。

計算手順は以下のとおりである。

- (1) 単位空間の感度 β と標準SN比 η を求める。
- (2) 単位空間のデータから2変数 $Y1, Y2$ を求める。
- (3) 求めた2変数で分散共分散行列を求め、余因子行列を求める。
- (4) 単位空間のマハラノビス距離 D を求める。

このRT法は主にパターン認識に利用でき、単位や尺度の異なる複数の評価項目を総合的に判定することが可能である。また従来の統計的手法を用いた判別システムでは、パラメータ設計や閾値設定がデータ量やばらつきの問題で難しい場合が多かった。しかし、RT法では単位空間を構成するデータ群は熟練技能者の判断に一存されており、熟練技能者の定性的、総合的判定と高い整合性をとる判定が可能になると期待される。単位空間を部位、動作、評価パラメータごとに作成することで、技能動作のどこを注目し評価しているのかといった、熟練者の暗黙知をシステムに利用することが可能となる。

また本研究では、技能動作を位置や速度等の物理パラメータで変化の大きい個所や熟練技能者の注目点により、要素動作として分解する。この要素動作を定義することで、要素動作ごとの正誤判定から誤りの傾向を把握することが可能となる。またこの類似の誤り動作から新たに単位空間を作成することで、誤り傾向を判定して習熟度別に学習者を分類して指導することが可能となり、学習者同士による学習効果の向上が期待される。

5. 解析方法

動作解析システムでは、まず赤外線透過フィルタを用いた2カメラ同期撮影システムで、溶接時の動作を撮影する。撮影した溶接動作からモーションキャプチャシステムにより3次元時系列位置情報を取得する。取得した位置情報から、動作習得の際に重要となる要素動作の分類、および評価項目データの算出を行う。これらのデータから品質工学の一手法であるRT法により、熟練者技能の模範動作データを「良品」として単位空間を作成し、学習者の動作データとのマハラノビス距離を求めて正誤判定を行う。

5. 1 システム概要

5. 1. 1 2カメラ同期撮影システム

3次元時系列位置情報を取得するには、2方向から同期して撮影した動画像が必要となる。また今回はアーク溶接の技能動作を測定対象としているため、非常に強いアーク光が撮影時に白飛びを引き起こし、マーカを撮影することが困難になってしまう。した

がって、本研究では IEEE1394 カメラ (PGR 社製 Flea2 カメラ白黒 VGA モデル) 2 台と PC を用いて、30fps で同期撮影が可能なシステムを作成した。また、通常 CCD カメラには赤外線カットフィルタが CCD 素子に取り付けられているが、今回使用したカメラは脱着可能であり、それを取り外してレンズに光吸収・赤外線透過フィルタ (富士フィルム製) を装着した。これは、アーク光の影響を最小限にし、さらに後工程のモーションキャプチャの時にマーカ追尾を容易にするために、マーカのみを撮影するためである。そのため、マーカには 6V 電球を使用した (図 4, 5)。

5. 1. 2 モーションキャプチャシステム

モーションキャプチャシステムは、2カメラ同期撮影システムで撮影した動画データを DippMotionPro (ディテクト社製) により計測ポイントの 3次元位置の時系列データに変換する (図 6)。なお、今回の測定は、肩部、肘部、手首部の各 1か所と、安全ホルダ部 3か所の計 6か所にマーカを貼付している。

5. 1. 3 筋電位計測システム

本システムでは、溶接動作時の腕の筋電位を測定することで、溶接棒を操作する際の腕の姿勢や溶接棒の位置の違いだけでなく、腕の使い方、溶接棒の保持、移動の仕方のコツを抽出する。筋電計は EMG アンプ (電極・アンプ一体型) とアイソレータ (バイオメトリクス社製)、データロガー (キーエンス社製) で構成されている。EMG アンプの貼付箇所は、僧帽筋、烏口腕筋、上腕二頭筋、橈側手根屈筋の 4か所である。筋電位データ 4ch とマーカ電圧 1ch をデータロガーに接続し、計測開始時にマーカを ON/OFF させることで、2カメラ同期撮影システムと同期させている (図 7)。

5. 1. 4 動作判定システム

動作判定システムでは、以下の手順により単位空間の作成、および学習者の動作判定を行う。

・要素動作の抽出

本システムでは、動作の「静」と「動」の切り替わる時点に着目し、この時点を経準として対象動作を複数の動作に分割する。これを解析の基本単位とし、「要素動作」と定義する。今回の実験では溶接技能動作のうちストレートビードを対象とし、アーク開始時操作とビード終点時の操作は除外した。

・評価項目の算出

今回の実験では、溶接棒と板との角度 (水平面、垂直面)、各部位の位置、速度ベクトルの各情報を算出した。

・単位空間作成

熟練技能者のアンケートから技能動作で重要、か

つ習熟度に応じて必要と思われる評価項目を選択し、各要素動作の単位空間を作成する。ここで、あらかじめ熟練技能者の動作データからマハラノビス距離を求める。

・動作判定

学習者の動作データも上記の処理を同様にを行い、教授者の単位空間からマハラノビス距離を求める。設定した閾値によりどの要素動作が誤っているかを判定する。



図4 アーク溶接作業図



図5 撮影結果例

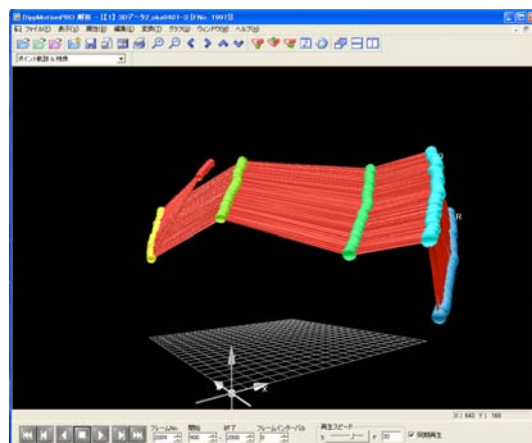


図6 溶接動作の3次元軌跡 (DippMtionPro)



図7 EMG 計測例

5. 2 解析結果例

5. 2. 1 実験概要

今回の実験ではアーク溶接を対象とし、手技をストレートビートとした。また、被験者は実務経験のある上級溶接者1名と学生1名の比較を行った。

5. 2. 2 RT 法解析結果

まず、上級溶接者の9データを単位空間とし、そのマハラノビス距離を求めた結果を示す。

表1 単位空間マハラノビス距離

単位データのMD			
データNo.	MD(2乗)	Y1 =β	Y2 =√Ve
1	0.138902	0.996734	1.133163
2	1.198859	0.988482	1.203154
3	3.016679	1.014364	2.499054
4	1.832367	0.994466	2.850331
5	0.609382	0.99251	1.827266
6	0.160882	1.002453	0.947814
7	0.136547	0.999798	0.927139
8	0.674723	1.002939	0.429195
9	1.23166	1.008254	0.349302
平均値	1	1	1.351824

求めたマハラノビス距離から単位空間として十分収束していることが分かり、単位空間として問題がないことが分かる。

次にこの単位空間データを用いて、単位空間に使用していない上級者データと学生のデータのマハラノビス距離を求める。

表2 未知データのマハラノビス距離

未知データのMD			
データNo.	MD(2乗)	Y1 =β	Y2 =√Ve
1	1.067425	1.001406	2.523327
2	0.183519	1.004601	1.311461
3	146.5613	0.91318	12.57878
4	176.4595	0.896331	12.86833
5	165.6676	0.898338	12.38205
平均値	97.98786	0.942771	8.332788

この表の1, 2が上級者データ, 3~5が学生データである。この結果から明らかに学生データが上級者データと違うことが分かる。

次に、各評価項目の結果を検討する。

表3 各評価項目のマハラノビス距離

(a) 溶接棒角度

データNo.	MD(2乗)
1	4.170366
2	5.936707
3	192.2393
4	195.3858
5	238.0681

(b) 腕角度

データNo.	MD(2乗)
1	1.067425
2	0.183519
3	146.5613
4	176.4595
5	165.6676

(c) 手首角度

データNo.	MD(2乗)
1	7.144888
2	1.39197
3	70.68521
4	93.82237
5	80.40334

(d) 肘角度

データNo.	MD(2乗)
1	7.606412
2	0.661919
3	9.829995
4	35.23835
5	43.61642

(e) 肩角度

データNo.	MD(2乗)
1	2.146152
2	0.242742
3	2.889381
4	14.8349
5	1.176135

これらの結果から、学生は肩の角度は比較的上級者と同等の結果が得られているが、その他はほとんど一致していない。また上級者のデータを比較すると、腕角度と肩角度に関しては、試行に関係なく一致しているが、肘や手首は状況に対応して動かしているため、一致度が低い試行がある。

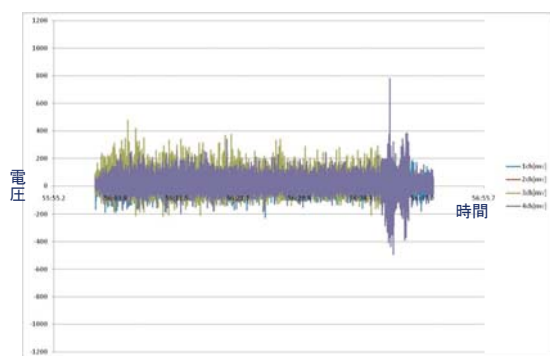


図8 筋電位計測例（上級者）

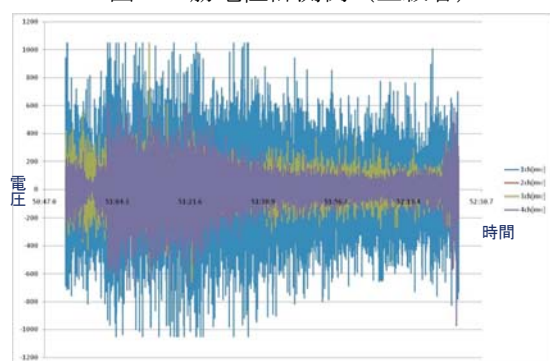


図9 筋電位計測例（学生）

この結果から、明らかに学生が溶接時に余計な力が入っていることが分かる。特に肩や肘から先の筋肉の電位が大きく、アークの変化が起きた時にスムーズに対応することが難しく、また筋疲労の増大が顕著になっていることが分かる。

7. まとめ

本稿では、まず技能動作教育における教育プロセスについて検討をし、教授者と学習者間のコミュニケーションで必要な技能動作の構造化、および意識の明確化について提案を行った。また、それらの実現のために RT 法を用いた技能教育支援システムを開発し、その効果を述べた。

謝辞

本研究は科研費（20500801）の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 経済産業省: 2009年版製造基盤白書, (2009).
- [2] 立林 和夫, 長谷川 良子, 手島 昌一: 入門 MT システム, 日科技連出版社, (2008).