

[研究助成 (A)]

身体的特徴のデータ解析による
定量的技術評価・向上システムの開発

2241029

研究代表者
(助成金受領者)舞鶴工業高等専門学校
電気情報工学科

講師

森

健太郎

[研究の目的]

電子機器の製造において、はんだ付けは重要な工程の一つである。特に少量生産や試作品の製作では手作業によるはんだ付けが広く行われており、作業には一定以上の技能が求められる。一方で、はんだ付け技能は利き手や利き目などの身体的特徴の影響を受けると考えられるものの、個人の特性を考慮した技能評価や教育手法は十分に確立されていない。本研究では、身体的特徴と作業動作の関係を解析することで、作業者の特性に応じたはんだ付け技能の評価・教育システムを開発し、技能習得の効率向上を目指す。そのために、手のランドマーク検出モデルである MediaPipe Hand Landmarker [1] を用いて、はんだ付け作業時の映像から手指関節情報を抽出する。さらに、高専の学生や教職員を対象に収集した作業データを用いて、「熟練者」と「非熟練者」の動作の違いや、身体的特徴による動作特性の違いを明らかにし、個々の作業者に適した効果的な技能教育の実現を目指す。

[研究の内容, 成果]

■データセット

本研究では、はんだ付け作業時の関節情報の特徴を解析するため、舞鶴高専の学生および教職員を対象にはんだ付け実験を行った。被験者は図1(a)に示すサンハヤト製のハンダ付け検

定練習基板 (CT-VAL3) を用いて部品のはんだ付けを行い、その際の手元映像が記録された。実験では、カーボンフィルム抵抗 10 個、電解コンデンサ 4 個、セラミックコンデンサ 4 個の計 18 部品について、合計 36 箇所のはんだ付けを行った。カーボンフィルム抵抗器、電解コンデンサ、およびセラミックコンデンサは、それぞれ図1(b)の位置 1～20、21～28、29～36 にはんだ付けを行った。作業終了後、各はんだ付け箇所を目視で検査し、「良好」または「不良」の 2 値でラベル付けを行った。本実験は 2024 年度と 2025 年度にそれぞれ 1 回ずつ実施した。2024 年度は 53 名、2025 年度は 34 名の被験者を対象として実験を行い、延べ 87 名分のデータを収集した。図2は 2025 年度に実施した実験環境を示す。図3は記録された映像のサンプル画像である。

記録した映像から、はんだ付け作業時の手指関節情報を取得するため、姿勢推定ライブラリ MediaPipe Hand Landmarker を使用した [1]。はんだ付け実験により収集した手元映像に対し

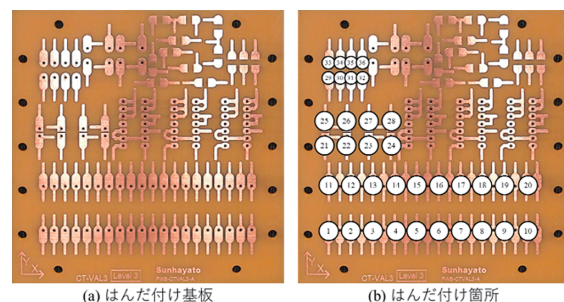


図1 はんだ付け基板

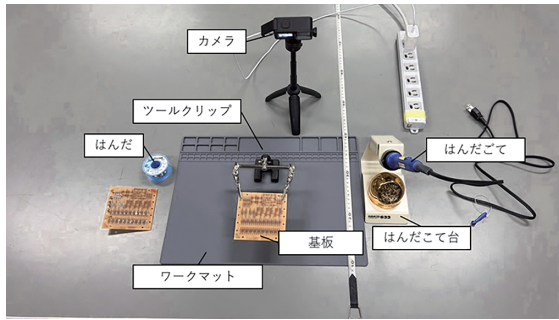


図2 実験環境



図3 記録した映像の例

てMediaPipeを適用し、右手（はんだごてを保持している手）の関節ランドマークを抽出した。MediaPipeでは各ランドマークの3次元座標を画像から推定することができる。本研究では、得られたランドマーク座標に基づいて各関節角度を算出した。求める関節位置のランドマークを b 、その両隣に位置するランドマークをそれぞれ a 、 c とすると、関節角度 θ_b は次の式で求められる。

$$\theta_b = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{ba} \cdot \mathbf{bc}}{\|\mathbf{ba}\| \cdot \|\mathbf{bc}\|} \right)$$

ここで、 $\mathbf{ba}$ および $\mathbf{bc}$ はそれぞれ点 b を基点とするベクトルである。本研究では表1に示す15種類の関節角度を算出し、各解析における特徴量として使用する。図4(a)はMediaPipeにより取得される21箇所のランドマークを示しており、図4(b)は角度が算出される関節位置を示す。

表1 角度を算出する関節

No.	指	関節
0	Thumb	carpometacarpal (CMC)
1	Thumb	metacarpophalangeal (MCP)
2	Thumb	interphalangeal (IP)
3	Index	metacarpophalangeal (MCP)
4	Index	proximal interphalangeal (PIP)
5	Index	distal interphalangeal (DIP)
6	Middle	metacarpophalangeal (MCP)
7	Middle	proximal interphalangeal (PIP)
8	Middle	distal interphalangeal (DIP)
9	Ring	metacarpophalangeal (MCP)
10	Ring	proximal interphalangeal (PIP)
11	Ring	distal interphalangeal (DIP)
12	Little	metacarpophalangeal (MCP)
13	Little	proximal interphalangeal (PIP)
14	Little	distal interphalangeal (DIP)

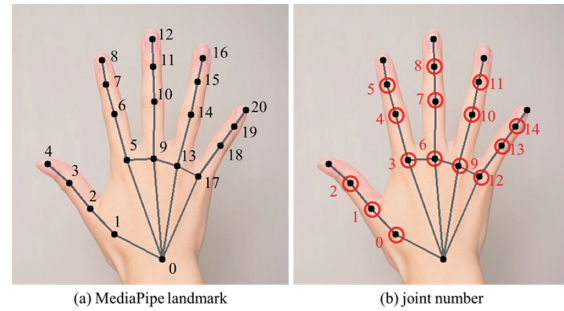


図4 ランドマークと関節の位置

■はんだ付け技能評価システムの開発

先行研究において、我々は、「良好」と「不良」の間で、はんだ付け作業時の手指の特定関節角度に違いがみられることを確認した [2]。そこで、作業者の作業品質向上を目的として、はんだ付け作業時の手指関節をリアルタイムに推定し、理想的な関節角度で作業を行えるよう作業者へフィードバックを行うシステムを開発した。本システムは Jetson Nano, ミニディスプレイ, Web カメラで構成されるスタンドアロン型のシステムである。作業中の手指を Web カメラで撮影し、Jetson Nano 上でリアルタイム関節角度推定を行い、現在の関節角度と理想的な関節角度との差がミニディスプレイ上に表示される。図5に本システムを示す。図6は本

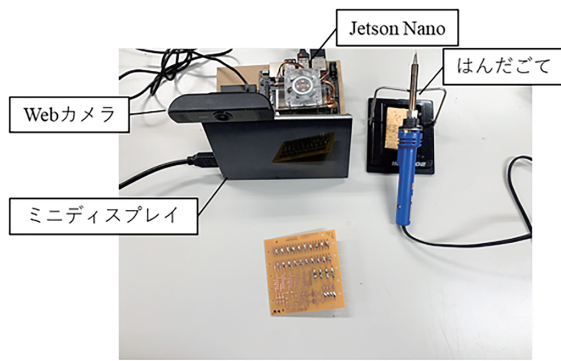


図5 はんだ付け技能評価システム

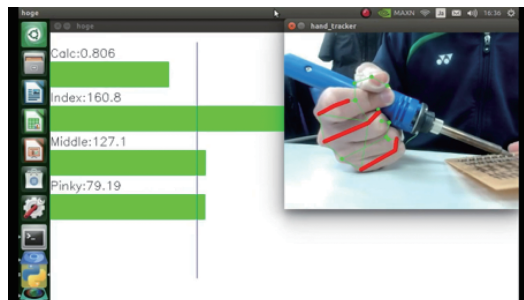


図6 システムによる出力例

システムのミニディスプレイに出力される映像の例である。

本システムの有効性を検証するために、2024年度のはんだ付け実験では52名の被験者を対象として評価実験を実施した。評価実験では、通常通りにはんだ付け作業を行った場合と、本システムを利用してはんだ付け作業を行った場合の2条件で実験を行い、その結果を比較した。なお、システムにおける理想的な関節角度には、先行研究[2]において作業結果が「良好」と判定された被験者の関節角度の平均値を用いた。本実験の結果、52名中33名の被験者において、本システムの利用により「不良」と判定されたはんだ付け箇所数が減少した。さらに、対応のあるt検定の結果、本システム利用時と非利用時の間で統計的に有意な差が認められた($p < 0.05$)。

■身体的特徴にもとづく関節角度解析

2024年度のはんだ付け実験では、作業者の身体的特性として、利き目、作業経験年数、身

長および眼鏡使用の有無に関する情報を収集した。これらの身体的特性が作業動作に与える影響を検証するため、収集した情報に基づいてデータセットを複数の群に分類し、各群における関節角度とはんだ付け品質との関連性を調査した。欠損値を含むデータを除外した39名分のデータを対象に分析を行った結果、利き目によって、「良好」と「不良」の間で有意差が認められる関節が異なることが明らかとなった。具体的には、利き目が右目の被験者群では、中指の関節角度において「良好」と「不良」の間に有意差が認められた。一方、利き目が左目の被験者群では、人差し指の関節角度において有意差が認められた。

これらの結果を踏まえ、2025年度には再度はんだ付け実験を実施し、利き目と関節角度との関係について調査を行った。本実験は34名の被験者を対象として実施し、その内訳は利き目が右目の被験者26名、左目の被験者8名であった。また、36箇所のはんだ付け結果に基づき、すべての箇所が「良好」と判定された被験者を「熟練群」、1箇所以上「不良」と判定された被験者を「非熟練群」として分類した。

表1に示した15種類の関節情報をそのまま用いて解析を行うと、関節動作の特徴が高次元となり解釈が困難になるため、主成分分析(PCA)を適用し、特徴量の次元削減および関節構造の特徴抽出を行った。表2に、第1主成分(PC1)および第2主成分(PC2)における各指関節の主成分負荷量を示す。表中の太字は、各主成分において負荷量の絶対値が0.3を超える項目を表している。表2より、PC1では複数の指のmetacarpophalangeal(MCP)が高い負荷量を示しており、手指全体の付け根関節の動作を反映した成分であると考えられる。一方、PC2では各指のproximal interphalangeal(PIP)およびdistal interphalangeal(DIP)が高い負荷量を示しており、指の屈曲・伸展動作を反映した成分であると解釈できる。

次に、各主成分スコアについて、「熟練群」

表2 主成分負荷量

No.	指	関節	PC1	PC2
0	Thumb	CMC	-0.32	0.08
1	Thumb	MCP	-0.20	-0.05
2	Thumb	IP	0.37	0.05
3	Index	MCP	0.36	-0.05
4	Index	PIP	-0.19	0.19
5	Index	DIP	-0.13	0.30
6	Middle	MCP	0.41	-0.04
7	Middle	PIP	-0.22	0.28
8	Middle	DIP	0.12	0.40
9	Ring	MCP	0.40	-0.02
10	Ring	PIP	0.00	0.42
11	Ring	DIP	0.17	0.37
12	Little	MCP	0.32	-0.04
13	Little	PIP	0.09	0.38
14	Little	DIP	0.11	0.40
Variance explained			0.36	0.31

表3 「熟練群」と「非熟練群」の比較（全データ）

	熟練群 (Mean ± SD)	非熟練群 (Mean ± SD)	p 値
PC1	-0.04 ± 1.81	0.02 ± 2.49	0.865
PC2	1.45 ± 0.96	-0.60 ± 2.23	0.005

と「非熟練群」の間で有意差が存在するかを調査した。表3に、データセット全体における両群の主成分スコアの平均値、標準偏差およびマン・ホイットニー U 検定による p 値を示す。表3より、PC2のp値は0.05未満であり、「熟練群」と「非熟練群」の間に統計的に有意な差が認められた。

さらに、利き目に基いて被験者を2群に分類し、各群において「熟練群」と「非熟練群」の比較を行った。表4に、利き目が右目の被験者群における群間比較の結果を示す。データセット全体の結果と同様に、利き目が右目の被験者群においてもPC2で統計的に有意な差が認められた ($p < 0.05$)。また、「熟練群」と「非熟練群」の平均値の差は、データセット全体よりも利き目が右目の被験者群の方が大きかった。最後に、表5に利き目が左目の被験者群における群間比較の結果を示す。利き目が左目の

表4 「熟練群」と「非熟練群」の比較
(利き目が右目の被験者のみ)

	熟練群 (Mean ± SD)	非熟練群 (Mean ± SD)	p 値
PC1	-0.32 ± 1.28	0.02 ± 2.56	0.935
PC2	1.88 ± 0.44	-0.83 ± 2.41	0.002

表5 「熟練群」と「非熟練群」の比較
(利き目が左目の被験者のみ)

	熟練群 (Mean ± SD)	非熟練群 (Mean ± SD)	p 値
PC1	1.05 ± 2.88	0.02 ± 2.27	1.000
PC2	-0.27 ± 0.32	0.07 ± 1.37	0.643

被験者群では、いずれの主成分においても統計的に有意な差は認められなかった。

■考察

関節角度データにPCAを適用した結果、PC1は主にMCP関節、PC2はPIP関節およびDIP関節を反映する主成分であると解釈された。群間比較の結果、「熟練群」と「非熟練群」の間でPC2に統計的に有意な差が認められた。PC2は指先関節（PIP関節およびDIP関節）の動作を反映する主成分であることから、はんだ付け品質の違いには指先の制御能力が関与している可能性が示唆された。また、PC2の平均値は良好群で高く、不良群で低かったことから、良好群では指先関節の屈曲がより大きい傾向にあると考えられる。さらに、利き目が右目の被験者群ではこの傾向がより顕著であった一方、左目の被験者群では有意な差は認められなかった。このことから、利き目が作業時の手指動作と作業品質の関わりに影響を及ぼす可能性が示唆された。ただし、左目の被験者数は限られていたため、今後さらなる検証が必要である。

■まとめ

本研究では、高専の学生および教職員を対象にはんだ付け実験を実施し、作業映像を収集した。さらに、MediaPipe Hand Landmarkerを

用いて作業時の手指関節情報を取得し、これらのデータを活用した技能評価システムの開発と、身体的特徴に基づく作業動作解析に取り組んだ。

技能評価システムでは、先行研究において作業結果が「良好」と判定された被験者の平均関節角度を理想的な関節角度として設定し、作業者の関節角度が理想的な状態に近づくようリアルタイムにフィードバックを行った。評価実験の結果、本システムを利用した被験者の約6割において、「不良」と判定されたはんだ付け箇所数の減少が確認された。このことから、本システムははんだ付け技能の評価および教育支援に有効であることが示された。

また、身体的特徴が作業動作に与える影響を調査するため、利き目に着目した解析を行った。その結果、利き目によって作業品質と関節動作の関係が異なる可能性が示された。特に、利き目が右目の被験者群では、指先関節の動作を表す主成分において「熟練群」と「非熟練群」の間に有意な差が認められた。これらの結果は、身体的特徴を考慮した技能評価および教育支援の有効性を示唆している。

今後は、被験者数の拡大や他の身体的特徴を含めた解析を進め、得られた知見を技能評価・

教育システムへ導入することで、作業者ごとの特性を考慮した適応的な技能教育の実現を目指す。

■参考文献

- [1] F. Zhang, V. Bazarevsky, A. Vakunov, A. Tkachenka, G. Sung, C. L. Chang, and M. Grundmann, "MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking", arXiv preprint arXiv:2006.10214, 2020.
- [2] 北村 悠, 森 健太郎, はんだ付け巧拙原因の推定とフィードバックシステムの作製, 電子情報通信学会 総合大会, 2023.

[成果の発表, 論文など]

- [1] Kento Jinkawa, and Kentaro Mori: "Evaluation of Soldering Skill Using Fuzzy Inference", 13th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 25th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS), 2024.
- [2] 平田 爽馬, 森 健太郎: 身体的特徴を考慮した教師なしクラスタリングによるはんだ付け動作の分類と比較分析, 第41回ファジィシステムシンポジウム, 2025年.
- [3] 森 健太郎, 陣川 健斗, 東口 富洋, 平田 爽馬: 作業者特徴に基づいたはんだ付け動作の映像解析, 電子情報通信学会 総合大会 2025年.
- [4] Kentaro Mori, Soma Hirata, and Tatsuki Kataoka: "Finger Joint Angle Features of Soldering Iron Handling for Quality Assessment Using Hand Landmark Detection", International Journal of Biomedical Soft Computing and Human Sciences, 投稿中.