

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：32601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21353

研究課題名(和文) 技能と品質の形式知化による3DCGを用いた技能訓練システムの開発

研究課題名(英文) Development of skill training systems using visualized skilled-work motion and its effect on product quality

研究代表者

肥田 拓哉 (Hida, Takuya)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：70748326

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)：本研究では熟練者の技能が品質に与える影響を可視化し、金属塗装作業における技能訓練システムを開発することを目的とした。まず、モーションキャプチャシステムと3DCGソフトウェアを使用し、作業者の動作と製品の品質を可視化した。さらに、訓練者が熟練者の動作を経験し、その技能を評価することを可能にするため、熟練者の技能を形式知化した。また、製品の品質を決定する要因である塗膜の厚さに影響を与える7つの因子を抽出し、実験により定量化した。これらの結果に基づいて、新人作業者が塗装作業を学習するための技能訓練システムを開発した。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to visualize the proper skills and their effects on the quality, and to design skill training system in metallic painting operations. Product quality depends on a worker motion and the effects of his/her tools. Therefore, changes to a worker motion and the quality of products were visualized using a motion capture system and three-dimensional computer graphics (3DCG) software. Furthermore, a system requires to enables a trainee to experience the proper motion and evaluate his/her skills. Thus, a skilled worker motion was analyzed to extract skills as explicit knowledge. Furthermore, an experiment was conducted to visualize the quality of the metallic painting operation with film thickness as an index. Seven factors for film thickness were extracted and these were quantified by the experiment. Based on the result, skill training system was developed for a new worker to learn it.

研究分野：人間工学

キーワード：科学教育 技能訓練 塗装作業 バーチャルリアリティ

### 1. 研究開始当初の背景

日本の中小製造業では、生産技術体系の変化や技能者の世代別構成の不均衡化に対する危機感を背景として、技能継承が課題となっている。本課題で対象とする塗装作業は、ミクロン単位の精度で製品を仕上げる必要があり、技能を習得するためには多くの時間がかかる。そのため近年では、大量生産品において塗装作業の機械化が広く進められている。

一方、一品生産や多品種少量生産、および人の感覚に依存した超高精度が求められる製品では、熟練者の手による塗装作業が行われている。そのため製造現場では、熟練者が未熟練者に付いて、自らの経験と勘・コツを指導するOJT (On the Job Training) を実施してきた。しかし、OJT による訓練では、訓練者が作業の動きに慣れただけであり、適正な作業をしているのかを明確に判断することはできない。このように、製造現場において暗黙知となっている熟練者の技能を訓練する OJT は体系化されていないと考えられる。

### 2. 研究の目的

中小製造業では人の手に頼らざるを得ない作業が多く、そのような作業の技能継承が課題となっているといえる。そのため、作業動作や技能が製品の品質に与える影響の解明が期待されている。

そこで本課題ではそれらの関係を解明し、技能訓練システムを開発することで新人作業者の早期育成に役立てることを目的とする。具体的には、人の手による熟練作業における技能を定量化し、技能と製品品質の関係を明らかにすることで、未熟練者に対する技能訓練システムを開発する。

### 3. 研究の方法

本課題で対象とする塗装作業では、作業者の動作が道具 (スプレーガン) を経由して製品に作用し、製品表面の状態が変化することで品質の良否が決定される。技能訓練のためにはこの過程を明らかにする必要がある。そのため、熟練者の動作と道具の使い方を定量化し、作業の変化による品質の段階的な変化を 3DCG を用いて見える化する。そして、被訓練者が適正な動作を体験し、被訓練者の技能レベルを評価、およびフィードバックできるシステムを開発する。

### 4. 研究成果

#### (1) 熟練者の技能の抽出

作業者の動作の変化はスプレーガンの動きの変化に影響を与え、それらが製品の塗装品質の良否を決定すると考えられる。そのため、モーションキャプチャシステム (OptiTrack) を用いて、熟練者の作業姿勢や動作速度、およびスプレーガンの傾きや移動速度を計測した。計測したデータの一例と

して、熟練者における手首の関節角の時系列データを図 1 に示す。青線が位置の変化を表し、赤線が角度の変化を表す。

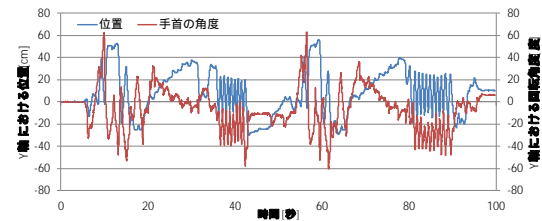


図 1 熟練者における手首の位置および角度

作業者の動作の全体像をつかむため、横振り動作の各関節角の時系列データを用いて、標準偏差から全身各部位の動きの大きさに着目した。動作のデータは 18 箇所の部位の X, Y, Z 軸の角度データと腰の X, Y, Z 軸の位置データの合計 57 個のデータを用いた。熟練者の横振り動作における各関節データの標準偏差の結果を図 2 に示す。右腕関節の標準偏差が特に大きく、胴体部と左腕関節も標準偏差が大きいことがわかる。この結果から、横振り動作の主要な動作は右腕により行われ、胴体、左腕は右腕の動作と連動していると考えられる。

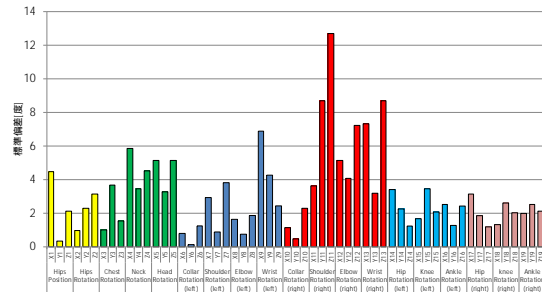


図 2 熟練者における関節データの標準偏差

各関節角の時系列データから低次元で動作の全体像を抽出するため、標準偏差が大きかった胴体、右腕関節、左腕関節における 11 箇所の関節角について主成分分析を行った。横振り動作における主成分寄与率を表 1 に示す。各動作の主成分寄与率をみると、第 3 主成分で累積寄与率が 80% を超えていることがわかる。このことからこの 3 つの主成分を熟練者の動作を特徴づける指標とし、動作の特徴を抽出した。

表 1 横振り動作における主成分寄与率

|           | 第1主成分 | 第2主成分 | 第3主成分 |
|-----------|-------|-------|-------|
| 寄与率 [%]   | 39.1  | 31.3  | 10.8  |
| 累積寄与率 [%] | 39.1  | 70.4  | 81.2  |

作業者の動作の詳細な特徴を抽出するため、熟練者の位置データと関節角データを用いて横振り動作の動作パターンについて分析した。動作パターンには周期的な動作が含まれているため、分析項目は動作の振り幅、それによる回転の変化、移動速度、スプレー

ガンと対象物との距離が対象となると考えられる。これらの分析項目に対して、軸ごとに分析して熟練者の技能を抽出した。

熟練者の横振り動作について、熟練者の X 軸に対する動作データ、Y 軸に対する動作データ、スプレーガンと対象物との距離のグラフをそれぞれ図 3、図 4、図 5 に示す。図 3 より、熟練者は左右の移動方向を反転させるときに製品に塗装させないようにしていることがわかる。図 4 より、スプレーガンを左右に振りながら、下から上へ移動させていることがわかる。また、Y 軸の位置の変化が階段状になっていることから、左右に振る際はできるだけ高さを変えないように動かしていることがわかる。図 5 より、スプレーガンと対象物との距離に関しては、距離が時間変化によって大きく変化することなく一定に保っていることがわかる。また、熟練者と初心者を比較すると、熟練者は一定の振り幅と手首角度であり、一度に塗装する範囲は狭く、動きが速いことがわかる。

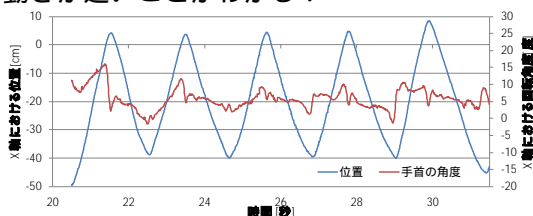


図 3 熟練者における X 軸の手首の動き

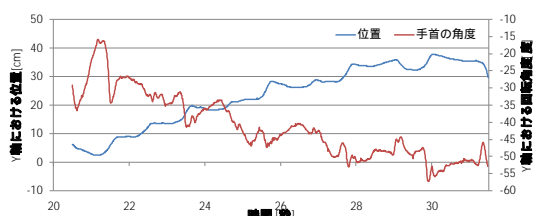


図 4 熟練者における Y 軸の手首の動き

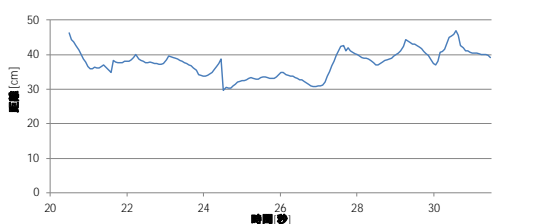


図 5 熟練者におけるスプレーガンと金属板との距離

表 2 作業条件

| 要因  | エア圧  | 塗装パターン (上下) | 塗装パターン (左右) |
|-----|------|-------------|-------------|
| 概念図 |      |             |             |
| 要因  | 塗装距離 | 膜厚分布        | パーティクル      |
| 概念図 |      |             |             |

## (2) 品質の見える化

作業条件が塗装品質に与える影響を明らかにするため、塗装作業に関する先行研究と対象企業 X 社の作業員へのヒアリングからスプレーガンの吐出に関わる要因を抽出した。作業条件を表 2 に示す。そして、これらの作業条件を定量化した。

スプレーガンのエア圧の調整は、主にスプレーガンに内蔵されている吐出量調整ツマミとエアコンプレッサーで調整される。これについては X 社の QC 工程表で決められている基準値を用いた。

塗装パターンを定量化するために測定実験を実施した。塗装パターンの調整は、スプレーガンに内蔵されているパターン調節ツマミで調整される。実験では、ツマミ調節の目盛が最小時と最大時の塗装パターンを、ビデオカメラを用いて上方向および横方向からの視点で撮影した。そして、その動画から上下および左右の塗布角度を計測した。

スプレーガンの塗装最大距離を定量化するために測定実験を実施した。スプレーガンの距離はスプレーガンに内蔵されているエア量調節ツマミで調整される。実験では、エア量調節ツマミ最大時と最小時の塗料の吐出距離を測定した。その結果、最大距離は塗装パターンに関係しないことがわかり、その他の要因に影響されず同じ最大距離で塗料を吐出させることができることが明らかとなった。

塗料の分布を定量化するための測定実験を実施した。塗料の膜厚は複数の作業条件によって変化するため、すべての作業条件を考慮してデータを計測することは困難である。そこで、作業条件を任意の値に設定し塗装時間の違いによる膜厚の変化と膜厚分布を分析して定量化した。実験では、スプレーガンを動かさずに、塗装時間を 0.50 秒、0.75 秒、1.00 秒に設定した。膜厚はフィッシャー・インストルメンツ社の膜厚測定器 (DIN EN ISO 2360) を用いて塗装された箇所を 1cm 間隔で測定した。測定したデータを 3D 等高線で表した結果の例を図 6、図 7、図 8 に示す。

これらのデータを用いて行、列ごとに膜厚分布の傾向を観察した。グラフの山がもっとも大きいのは中心部であり、中心部から離れていくごとに山が小さくなることがわかる。また、縦方向よりも横方向において中心から離れると急激に膜厚が減少していることがわかる。

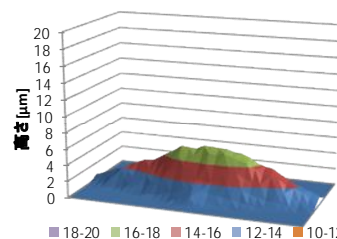


図 6 塗装時間 0.50 秒における膜厚分布

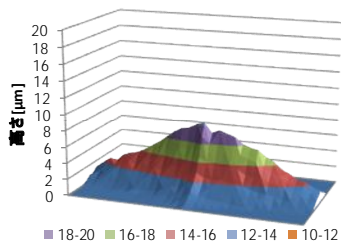


図7 塗装時間 0.75 秒における膜厚分布

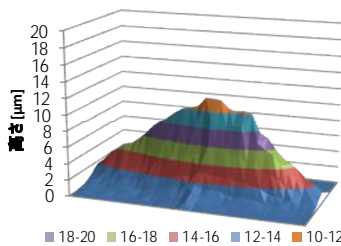


図8 塗装時間 1.00 秒における膜厚分布

定量化した作業条件を 3DCG で実装するため、3DCG ソフトである Maya (Autodesk) を用いた。スクリプト言語を用いて 3DCG 上でのパーティクルの付着数を出力するためのシステムを作成した。具体的には、対象物を 1cm x 1cm ごとに分割し、分割した箇所ごとに付着したパーティクルの数を測定するシステムである。

これまでに明らかになった作業条件、膜厚分布を用いて 3DCG によりスプレーガンによる塗装を再現した。さらに実験で測定した膜厚のデータと 3DCG 上で得られたパーティクルの数の分布の割合を比較することで再現度を向上させた。1.00 秒の塗装をシミュレーションした際の膜厚分布を再現した等高線を図9に示す。

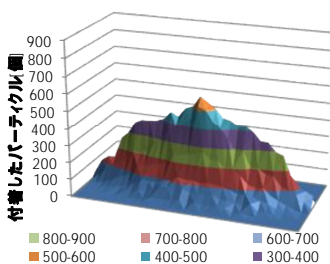


図9 塗装時間 1.00 秒のシミュレーションにおける膜厚分布

実際に塗装した図8とシミュレーションにより再現した図9の各セルの割合の差を分析したところ、2箇所のみが14.6%の差があったがその他の箇所は10%未満の差であった。膜厚測定器の測定誤差は±10%とされているため、この差を考慮すると現状のシミュレーション結果でも3DCGでのスプレーガンを再現することができたと考えられる。

### (3) 技能訓練システムの開発

技能の理解・習得・熟達を効果的に進めるため、技能評価、技能診断、訓練実施の3つの要素を含むシステムを開発した。

技能評価システムは、動作効率性と品質の2つの項目を評価するためのシステムである。動作の効率性を評価するために、(1)において抽出した技能を用いて評価基準となる規範動作のデータを作成した。横振り動作における規範動作を表3に示す。品質を評価するために、(2)における実際の膜厚とシミュレーションにおける膜厚の相関関係を分析した。相関係数は0.987となり、高い正の相関があることがわかった。技能評価システムを図10に示す。

表3 横振り動作における規範動作

| 動作パターン | 分析項目           | 熟練者の<br>平均値  |
|--------|----------------|--------------|
|        | 左右の振り幅         | 44.8 cm      |
|        | 左右の回転角度        | 15.5 degree  |
| 横振り動作  | 横方向の移動速度       | 59.9 cm/sec. |
|        | 縦方向の移動速度       | 3.3 cm/sec.  |
|        | スプレーガンと対象物との距離 | 37.5 cm      |

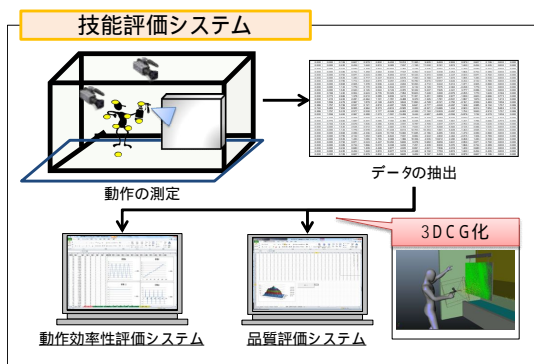


図10 技能評価システム

技能診断システムは、リアルタイムの動作と技能評価システムから得られた結果のデータを用いて、作業要素ごとの動作に対してアドバイスを表示するシステムである。リアルタイムデータ教示システムでは、モーションキャプチャシステムの SDK と C#を用いて、訓練者の動作データをリアルタイムに取得し、それと同時に規範動作の軌跡を描画することで、適正な動作を追従できる。アドバイスシステムでは、動作の効率性評価において模倣率が低い項目をミスタイプに分類し、ミスタイプ別にアドバイスを表示する。技能診断システムを図11に示す。

訓練実施システムは、作業における定型的知識、知的管理系技能、感覚運動系技能を効果的に教育するためのシステムである。効果的に訓練するためには、作業要素を網羅的に訓練するのではなく、伝承すべき作業要素を明らかにし、習熟レベルに合った訓練内容を選定する必要がある。そこで、訓練すべき項目の順序を決定する要因として、作業要素の重要度と難易度を定量化した。重要度について

ては、各作業要素の品質と生産性への影響度を考慮した、難易度については、位置とX,Y,Z軸における角度の変化量を考慮した。訓練実施システムを図12に示す。

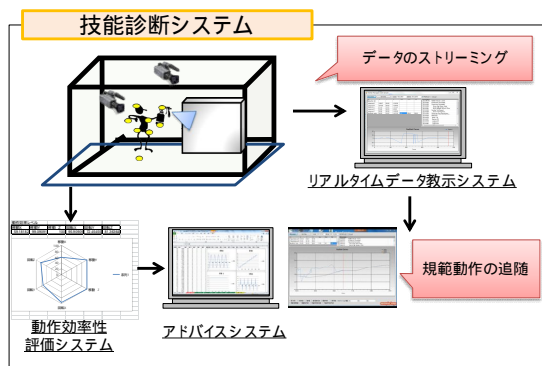


図11 技能診断システム



図12 訓練実施システム

(4)今後の展望

本課題では塗装作業を対象として、Off-JTによる技能訓練システムの開発方法とその手順を考案した。しかし、本課題には改善すべき余地が残されているため、今後の展望として以下に示す。

技能訓練システムでは、作業員およびスプレーガンの動作を取得するために、光学式のモーションキャプチャを用いた。しかし、光学式のモーションキャプチャは、中小企業にとっては高額であり、広い設置スペースも必要となる。本システムをより広範に活用するためには、安価で簡便なモーションキャプチャを利用できるようにする必要がある。

また、MR (Mixed Reality) 技術を導入して実際の塗装作業により近づけることで、人間工学や認知心理学に基づいた作業員が理解しやすい表示形式、かつ習得しやすい情報量の教示やフィードバックを実施し、訓練効率の向上させる必要がある。

さらに、考案した訓練方法は分習による訓練を基本としているが、協応する技能は分習するだけでなく、複数の訓練項目と合わせて訓練するほうが効果的であると考えられる。そのため、技能訓練において、各作業要素の関係性を明らかにして同時訓練する項目と

個別に訓練するための項目を分類するための基準を策定することによって、より効果的な訓練が期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計3件)

Kazuki Kishi, Takuya Hida, Ryosuke Nakajima, Toshiyuki Matsumoto, "Proposal of Tactile Inspection Conditions for Valid Defects Detection Focusing on Haptic Perception with Active Touch", *Proceedings of the 17th Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference*, 査読有, Paper ID 0152

岸一輝, 肥田拓哉, 中嶋良介, 松本俊之, "視覚と触覚による二重タスクが外観検査における検査精度に及ぼす影響", 日本経営工学会 2016年秋季大会, 査読無, pp. 168-169

Takuya Hida, Masaki Kubo, Ryosuke Nakajima and Toshiyuki Matsumoto, "Visualization of Skilled Worker's Motion and its Effect on Product Quality in Painting Operation to Metal Plate", *Proceedings of the 16th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference*, 査読有, pp. 294-300

6. 研究組織

(1)研究代表者

肥田 拓哉 (HIDA, Takuya)  
 青山学院大学・理工学部・助教  
 研究者番号：70748326