

熟練技能工の技術伝承のためのローラー塗装動作の分析

その2 動きと筋活動の可視化に基づく熟練動作の特徴抽出

○西浦建貴*1 横山清子*2 森田智子*2 砂田治弥*2 宮木章吉*1 宮下尊之*1 稲葉了大*1 峯本正直*1
小川綾一*1 庄司榮樹*1 川端祥治郎*1 伊賀上竜也*1 竹内金吾*1 村木克彦*1 津田修*1

1. はじめに（制作背景）

近年、デジタル技術やインターネット技術の進展により、情報の保存形態・伝達の仕方が多様化してきている。特に、歴史的な遺産や伝統的な文化、芸能、職人のもつ技術など、意識して伝承することが必要なものに関しては、技術の発展に合わせて様々な形態での保存・伝達方法が展開している。図書館や美術館、博物館などでは、デジタルアーカイブと呼ばれる形で文化資産をデータベース化し、インターネットを通して広く伝えながら資産を保存する試みを行っている。また、職人技、舞踊といった無形文化財に当たるような動きのあるものを伝承するために、デジタル技術を用いた伝承方法を採用することも主流になってきた。瀬戸物の街・瀬戸市では、陶芸家が作品づくりをしている手の動きを 3DCG アニメーションで再現し、インターネット上で公開している[1]。他に、モーションキャプチャを用いて伝統舞踊を記録・解析する研究[9]や、バーチャルリアリティ技術を用いて、鑄造の作業工程を映像に反力を加えて再現したシステム[10]などが例に挙げられる。このように様々な形で技能伝承の試みがされているが、現段階では 1 人の熟練者の動作を対象としてデータを収集し、再現したものに限られている。

2. 制作目的

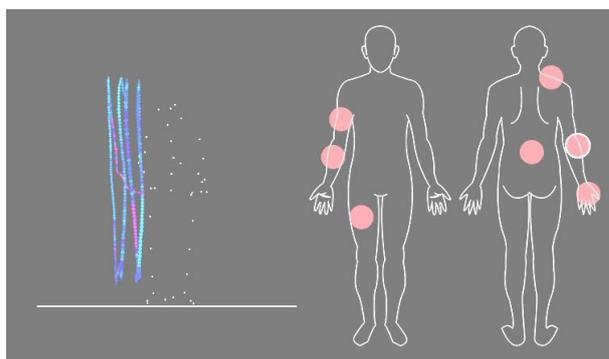
本制作では、塗装の熟練技能工の技術を実験から客観的、定量的に示したものを可視化することを目的とする。一人の熟練工を対象とした動作の再現ではなく、複数名の熟練工の技の共通項を抽出して効率的なモデル動作を見出すことを目指す。また、作業の効率性に加え、人間工学の観点から身体負担の少ない動作の特徴を明確にする。さらに、得られたモデル動作を学ぶために理解しやすい表現方法を提案する。

3. 制作内容

モーションキャプチャによる動作の解析と可視化について、横山研究室の博士後期院生の砂田は剣道の動作を対象として、身体に装着した任意のマーカーにおける動きの可視化、速度、加速度を描画するプログラムの製作をしている[8]。本制作ではこの動作の可視化プログラムをベースに、動作と併せて筋活動の変化を可視化していく。

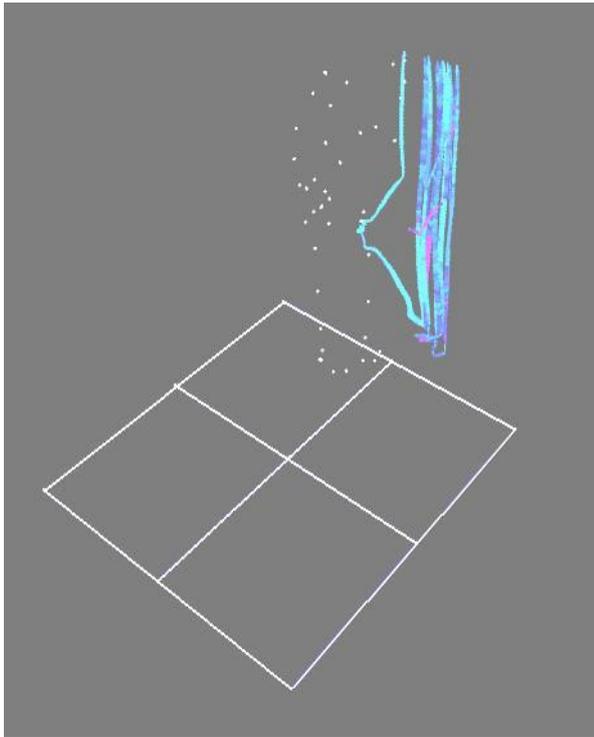
制作した可視化のプログラムの実行画面を図 1 に示す。

図 1 動作と筋活動の可視化プログラムの実行画面



画面左側で動作と筋活動の変化をアニメーションで描画している。白点はモーションキャプチャ撮影時に身体に装着した反射マーカーを示す。軌跡の線の太さが速度を表しており、線が太ければ速度が速いことを、細ければ速度が遅いことを示す。軌跡の色は筋活動の変化を表しており、赤→紫→青→水色の順に筋活動が小さくなる。画面左側の人体図の赤い円を任意に選択することで、選択された人体部位の筋活動の描画に切り替えられる。また、キーボードとマウスドラッグの操作で、図 2 のような任意の視点から動作を見ることができる。

図2 マウสดラッグ操作で視点を動かした様子



可視化は以下のような流れで行う。

(1) Excel で行う処理の流れ

- ①モーションキャプチャで身体の反射マーカークの時系列座標が記録されたデータをテキスト形式で出力し、Excel で開く。
- ②ローラーを持っている右手、中指付け根のマーカークを対象として、速度を求める。
- ③モーションキャプチャのサンプリング周波数に合わせて、区間平均処理で 50Hz にリサンプリングした筋電図のテキスト形式データを、Excel データの時系列に合わせて貼り付ける。
- ④各測定部位の筋電図の値の最小値・最大値を求め、最小値を-1、最大値を 1 として、筋電図の数値を-1~1 の範囲に正規化する。

(2) Processing で行う処理の流れ

- ①(1)で処理した Excel データをテキストデータに変換したものを読み込む。
- ②軌跡を描画する対象となるマーカークの X 座標、Y 座標、Z 座標、速度、正規化した筋電図の数値のそれぞれで配列をつくり、該当する項目の Excel 内での列のデータを読み込み→描画を繰り返していく。
- ③速度に関しては、速度の数値÷6 の値で円の大きさを調整して描画する。筋活動量の変化を表す色は、最小値-1~最大値 1 としたものを HSB カラーモードで H(色相):140~255, S(彩度):255, B(明度):255 に割り当てて描画する。

- ④描画する筋電図の部位をマウスクリックで変更できるように、指定された範囲(赤い円の内地)でクリックをされた場合に true/false の判定を行い、該当する筋電図測定部位の値を返して描画する。

4. 評価

制作の過程で同時に見え方を検討した結果、「動作の緩急がわかるように、線の強弱が明確にならないか」「筋活動の色の変化を赤系統にできないか」などの意見が出た。また、動作のリズムを直感的に理解するためには、速度よりも加速度の可視化の方が効果的であると考えられたため、これらの要因について可視化内容に改良を加え、4つの表現パターンを提案してアンケート評価・比較を行った。

この評価では、軌跡の色と太さをそれぞれ筋活動と加速度のどちらと組み合わせて表現するのがわかりやすいのか、わかりやすく変化を表すためにはどのような色表現が効果的かを検討することを目的とした。

以下が評価対象とした4つのパターンである。

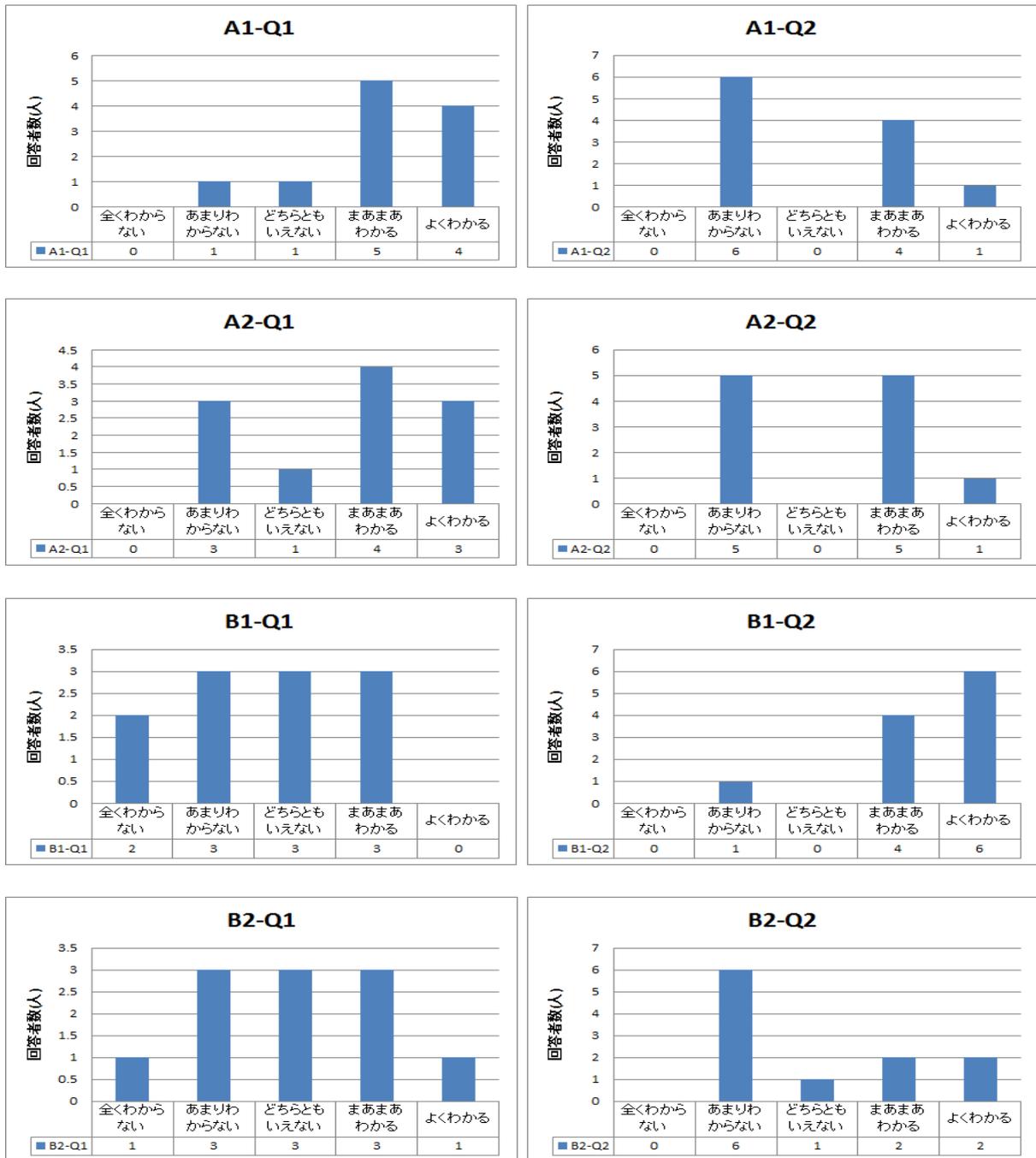
- (A1) 筋活動:色(薄紫→ピンク→赤の順に強い)
加速度:太さ(太=大きい, 細=小さい)
- (A2) 筋活動:色(白→ピンク→赤の順に強い)
加速度:太さ(太=大きい, 細=小さい)
- (B1) 筋活動:太さ(太=強い, 細=弱い)
加速度:色(青→紫→赤の順に大きい)
- (B2) 筋活動:色(青→紫→赤の順に強い)
加速度:太さ(太=大きい, 細=小さい)

各パターンで、表1に示す質問内容に対し、それぞれ筋活動の強弱・加速度の大小がわかりやすいかどうかを「よくわかる」「まあまあわかる」「どちらともいえない」「あまりわからない」「全くわからない」の5段階で評価した。大学生11名から得たアンケート評価の回答結果を、5段階評価の点数に対する人数分布図として図3に示す。

表1 質問内容

A1-Q1	色の変化から、筋活動の強弱が直感的にわかりましたか。
A1-Q2	線の太さの変化から、加速度の増減が直感的にわかりましたか。
A2-Q1	色の変化から、筋活動の強弱が直感的にわかりましたか。
A2-Q2	線の太さの変化から、加速度の増減が直感的にわかりましたか。
B1-Q1	色の変化から、加速度の増減が直感的にわかりましたか。
B1-Q2	線の太さの変化から、筋活動の強弱が直感的にわかりましたか。
B2-Q1	色の変化から、筋活動の強弱が直感的にわかりましたか。
B2-Q2	線の太さの変化から、加速度の増減が直感的にわかりましたか。

図3 5段階評価の点数に対する人数分布



回答結果を用いて、①筋活動・加速度を色・線の太さとどう組み合わせるとわかりやすいか、②どのような色の変化の仕方がわかりやすいかの2点を評価するため、5段階評価の「よくわかる」を5点、「まあまあわかる」を4点、「どちらともいえない」を3点、「あまりわからない」を2点、「全くわから

ない」を1点として、統計解析を行った。解析には、IBM社の統計解析ソフト SPSS を使用した。①B1-Q1 と B2-Q1、B1-Q2 と B2-Q2 のペアで、それぞれ対応あるt-検定を行った。その結果を表2に示す。また、対応サンプルの統計量を表3に示す。

表2 t-検定結果

対応サンプルの検定

	対応サンプルの差					t 値	自由度	有意確率 (両側)
	平均値	標準偏差	平均値の標準誤差	差の 95% 信頼区間 下限 上限				
ペア 1 B1-Q1 - B2-Q1	-0.364	1.629	0.491	-1.458	0.731	-0.740	10	0.476
ペア 2 B1-Q2 - B2-Q2	1.364	1.502	0.453	0.355	2.372	3.012	10	0.013

表 3 統計量

対応サンプルの統計量					
		平均値	度数	標準偏差	平均値の標準誤差
ペア 1	B1-Q1	2.64	11	1.120	0.338
	B2-Q1	3.00	11	1.183	0.357
ペア 2	B1-Q2	4.36	11	0.924	0.279
	B2-Q2	3.00	11	1.265	0.381

表 5 各平均値

	A1-Q1	A2-Q1	B2-Q1
平均値	4.09	3.64	3.00

表 4 一元配置分散分析の結果

分散分析						
		平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
q1_1	グループ間	6.606	2	3.303	2.646	0.087
	グループ内	37.455	30	1.248		
合計		44.061	32			

表 2 の中で右端のセルに両側検定の P 値を示す。 $p < 0.05$ の場合、2 つの標本間に有意差があると言える。

B1-Q1「色の变化から加速度の増減が直感的にわかったか」とB2-Q1「色の变化から筋活動の強弱が直感的にわかったか」の間では有意差は認められなかった。すなわち、色と加速度の組み合わせ、色と筋活動の組み合わせの間では、理解のしやすさに差が生じないといえる。一方で、B1-Q2「線の太さの変化から筋活動の強弱が直感的にわかったか」とB1-Q2「線の太さの変化から加速度の増減が直感的にわかったか」の間では、両側検定の値 $0.013 < 0.05$ であるので、有意差が認められた。すなわち、線の太さと加速度の組み合わせ、線の太さと筋活動の組み合わせでは、理解のしやすさに差が生じているといえる。このとき、表 3 に示す B1-Q2 の平均値のほうが B2-Q2 の平均値より大きいと、線の太さと筋活動の組み合わせのほうが理解しやすいという評価といえる。

②A1-Q1, A2-Q1, B2-Q1 の 3 標本間で平均値の差がどれだけあるかを求めるため、一元配置分散分析を行った。その結果を表 4 に示す。また、対象とする回答結果の各平均値を表 5 に示す。

表 4 の右端のセルに分散分析の P 値を示す。t-検定と同様、P 値が 0.05 未満の場合、3 つの標本間に有意差があると言える。

一元配置分散分析の結果、対象とした質問 A1-Q1, A2-Q1, B2-Q1 の回答結果の間には有意差は認められず、有意傾向にあるという結果に留まった。表 5 に示した各質問の回答結果の平均値を確認すると、A1-Q1 の値が最も高く、B2-Q1 が最も低い値であった。有意差は認められなかったものの、A1, A2, B2 の 3 パターンの色では、B2 に対して A1 の色の方が筋活動の変化を理解しやすい傾向にあると考えられる。

5. 本研究のまとめ

本研究では、塗装の熟練技能工の動作を対象に、塗装作業の効率的な動きを客観的、定量的に示し、その技能を伝承する支援を目的とした。熟練者 11 名、未経験者 11 名に同一の塗装のタスクを課し、モーションキャプチャによる動作測定、筋電計による筋電図測定を行い、定量的な分析を通して熟練者の動作の特徴を示していった。動作、筋活動を定量的な数値で示したことで、熟練者には共通していると捉えられる特徴がみられた。動作に関しては、小さい動作から大きい動作まで、安定した一定のリズムがあることが分かった。筋活動に関しては、作業中に筋活動が活発になる部位が未経験者とは異なり、作業に対して必要な身体部分で適切な力を使っていると考えられる結果であった。これらの特徴は、効率的な作業、身体負担の少ない動作、仕上がり品質の向上などを目指すにあたって参考とすべき要因であると考えられる。

6. 本研究の課題と展望

本研究では、熟練者 11 名の実験データを集めたが、塗装作業のモデル動作を抽出するためには十分なサンプル数とは言えず、これからより多くのサンプルを採取する必要がある。また、作業中の特定の動作(立位での前屈動作、膝の屈伸動作など)における筋活動の比較、関節角度による筋活動量の違い、年齢を加味した比較など、細分化した分析を行うことで、モデル動作抽出の精度向上につなげていきたい。

可視化については、データ処理の遅さが課題の一つとなっており、使用するプログラム言語やデータの処理方法を再検討する必要がある。今後、アンケート評価から得た結果を反映させながら、より分かりやすい表現方法や、可視化することで技能伝承に役立つ定量的データがどのようなものかを検討し、若年技能者の教育に活かせるコンテンツへ発展させたい。