

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1 モーションキャプチャ・筋電図を用いた人間工学実験の結果と考察

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

1. はじめに

塗装作業者の若手人材が減少している現状において、熟練技能工の最高品質の仕上がりを実現する技術と、身体負担が少なく効率の良い作業動作の特徴を伝承することが喫緊の課題である。伝統技能や熟練工の技能伝承について、バーチャルリアリティ技術を用い、鋳造作業の工程を、映像だけでなく反力も加えて再現する技能獲得システム¹⁾、切断工具の製造工程を3DCGによるアニメーション教材として作成するもの²⁾、日本舞踊の教育システム制作³⁾などの研究がある。職人技を筋電図により定量的に分析している研究として、熟練職人の京壁塗り習熟e-learningの作成⁴⁾、糸巻き動作への応用がある⁵⁾。

本研究では、ローラー塗装を対象として、熟練塗装技能工の作業動作の特徴を、モーションキャプチャと筋電図を用いた人間工学実験に基づく定量分析により明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

実験は、塗装経験15年以上の熟練技能工11名と塗装作業未経験の大学生11名、全員男性、右利き、身長180cm以下を実験参加者として実施した。写真1に示すように、モーションキャプチャスタジオに設置したボードをローラーで塗装する。図1に示す7部位の筋肉の筋電図を、写真2に示す無線筋電計を各筋肉に装着して測定した。さらに、その上にモーションキャプチャ用の赤外線反射マーカ40個を貼付した動作測定用スーツを着用して作業を行った。作業は、図2に示す、タスク1：ボード上半分の中央を5回上下に塗装する、タスク2：ボードの上から下まで中央を5回上下に塗装する、タスク3：ボ

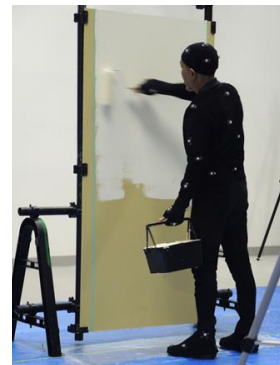


写真1 作業の様子

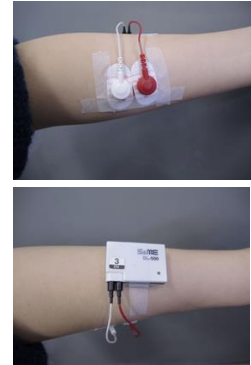


写真2 筋電図電極と無線筋電計

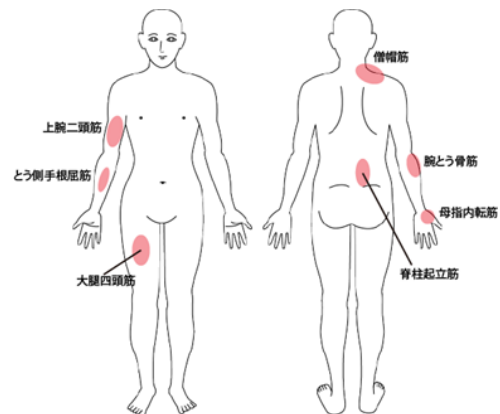


図1 筋電図測定部位

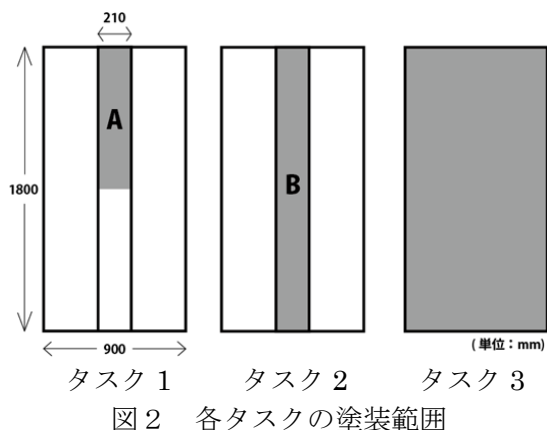
ード全体を塗装者が完成したと判断するまで塗装する、の3タスクとした。

まず、筋電図の個人差を除去するための基準動作を30秒間測定した。基準動作は、足を肩幅に開いた直立姿勢で、手を下に降ろし、利き手である右手によりローラーの握り手を、自身が最大と判断する力で握るものとした。その後、タスク1、2、3の

Analysis of Roller Painting Motion for Technical Tradition of Skilled Worker

- Results and Discussion of Ergonomics Experiments Based on Motion Capture and EMG

YOKOYAMA Kiyoko*¹, MORITA Tomoko*¹, NISHIURA Tatsuki*², MIYAKI Akiyoshi*²,
MIYASHITA Takayuki*², INABA Xxxx*², MINEMOTO Masanao*², OGAWA Ryouichi*²,
SHOUJI Xxxx*², KAWABATA Shoujirou*², IGAUE Tatsuya*², TAKEUCHI Kingo*²
KIMURA Katsuhiko*¹, TSUDA Osamu*¹



順で測定を行った。

実験に際しては、参加者には実験内容を口頭で説明し、参加者の意志で自由にいつでも測定を中止できる旨を伝えて実施した。本研究は、名古屋市立大学大学院芸術工学研究科倫理委員会の審査(28 芸倫一第 1 号)を得て実施した。

3. 解析方法

3. 1 筋電図の解析

図 3 に熟練塗装技能工のタスク 2 における拇指内転筋(手の甲、親指の付け根)の筋電図(a)と、同時にモーションキャプチャで測定したローラーを握る手の上下方向の位置の変動を示す。筋電図は、筋活動を反映してその振幅が大きくなるため、その振幅値から筋肉の活動量を推定する。図 3 で、手の移動に応じて握る力が変動していることが確認できる。

筋電図は、解析対象動作時間区間の積分値(iEMG、式(1))を解析指標とした。

$$iEMG = \sum_{t=t_1}^{t_2} (abs(EMG(t) - EMG_{avg})) \quad (1)$$

ここで、 $EMG(t)$ は、1kHz でサンプリングした、時刻 t_1 から t_2 までの測定筋電図。 EMG_{avg} は測定筋電図の平均値、 abs は絶対値の算出を示す。

筋電の値には個人差があり、また、同一個人においても電極の位置により値が変化するため、個人差を除去した比較を行うため、ローラーの握り手を最大の力で握った時の同一部位の筋電図から求めた積分筋電図で基準化を行った。

3. 2 モーションキャプチャデータの解析

モーションキャプチャは、各マーカの 3 次元位置座標を測定するものである。今回は、50fps (frame per second) でデータ化した。解析では、座標に加え、速度 (V mm/sec) と加速度 (A mm/(sec*sec)) の時系列を算出した。速度は、式(2)で表すように、1 フレーム内でのマーカの移動距離をユークリッド距離で

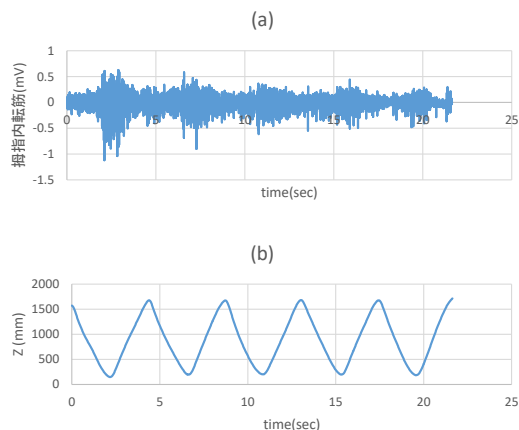


図 3 熟練工のタスク 2 の(a)拇指内転筋の筋電図と(b)手の上下方向の位置座標

求めた。加速度は、式(3)で示すように、1 フレーム内での速さの差とした。

$$V_n = \sqrt{(x_n - x_{n-1})^2 + (y_n - y_{n-1})^2 + (z_n - z_{n-1})^2} \quad (2)$$

$$A_n = V_n - V_{n-1} \quad (3)$$

ここで、 (x_n, y_n, z_n) は、 n フレーム目の対象マーカの 3 次元座標である。

4. 結果と考察

表 1 は、各タスクにおける熟練工と初心者の筋活動を比較したものである。表の数値は、基準動作の積分筋電図に対する比である。t-検定により熟練工 11 名と初心者 11 名の差の検定を行った結果も併せて記述している。拇指内転筋以外は、3 タスク何れも、10%有意水準での有意差は認められなかった。拇指内転筋では、タスク 1 で 5%未満の有意水準で差が認められ、タスク 2 では 6%、タスク 3 では 9%で差の傾向が見られた。何れのタスクにおいても、熟練工は最大の握り力に対して 30%から 40%の力で作業をしていることと比して、初心者は最大筋力の 60%から 70%の力を要しており、熟練工の 2 倍程度の強い力でローラーを握り塗装を行っていることが推測できる。

表 2 は、各タスクにおける熟練工と初心者のローラーを握っている手の動作を比較したものである。タスク 3 では、塗装面積が大きいいため、作業途中でローラーに塗料をつける動作が含まれる。その部分を除き、ボードの塗装動作のみを解析対象とした。

表1 熟練工と初心者の作業中の筋活動の比較

		僧帽筋	上腕二頭筋	とう側手根屈筋	腕とう骨筋	母指内転筋	大腿四頭筋	脊柱起立筋
task1	熟練工	2.68	1.07	0.35	0.45	0.33	1.24	1.50
	初心者	1.92	1.32	0.57	0.52	0.69	1.21	2.61
		N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	p<0.05	N.S.	N.S.
task2	熟練工	2.40	1.32	0.43	0.44	0.36	3.52	4.88
	初心者	2.26	1.54	0.57	0.52	0.65	3.69	7.13
		N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	p=0.06	N.S.	N.S.
task3	熟練工	3.39	1.54	0.49	0.57	0.38	2.90	3.67
	初心者	2.60	1.76	0.65	0.56	0.63	2.69	6.21
		N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	p=0.09	N.S.	N.S.

表2 熟練工と初心者の作業中の手の動作の比較

		時間 (sec)	速度_m (mm/s)	速度_s (mm/s)	加速度_m (mm/(s*s))	加速度_s (mm/(s*s))
task1	熟練工	18.77	8.34	3.96	0.34	0.46
	初心者	19.35	7.95	4.23	0.33	0.42
		N.S.	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
task2	熟練工	25.76	12.37	5.16	0.51	0.70
	初心者	34.57	10.57	5.37	0.34	0.44
		p=0.06	N.S.	N.S.	p=0.08	p<0.05
task3	熟練工	84.00	13.19	8.17	0.98	3.86
	初心者	109.26	10.35	6.38	0.72	0.99
		p=0.06	p<0.05	N.S.	N.S.	N.S.

時間は、各タスクを開始して終了するまでの時間の平均値、速度_mはフレーム単位の3次元空間内の移動距離の作業時間全体の平均値、速度_sはその標準偏差、加速度_mはフレーム単位の速さの差の平均値、加速度_sはその標準偏差を示す。10%有意水準で、タスク1ではどの指標にも有意差は認められなかった。作業時間は、タスク2、タスク3で、何れもp値6%で熟練工の方が初心者より作業時間が短い傾向が認められた。何れのタスクも、熟練工の作業時間が初心者の約75%であった。

また、タスク2では、加速度の平均値(p=0.08)と標準偏差(p<0.05)が、有意に熟練工の方が大きい結果が得られた。加速度の標準偏差が有意に大きいことは、力の加除の差が大きいことを表し、力の必要な部分と不必要な部分を効率よく分配していると考えられる。タスク3で熟練工の手の動作速度が有意に大きい結果は、作業時間と同様に作業の速さを反映している。

図4と図5は、タスク2作業時の、横軸がローラーを握る手の位置のZ座標(垂直方向の動き)、縦軸がその位置での手のマーカのフレーム単位で算出した速度を示している。すなわち、ボードの塗装位置に対するローラーを動かす速度を示しているといえる。タスク2は、ボードの上端から下端までの塗装を5往復繰り返す作業である。グラフ横軸の左側が、ボードの下端であり、右側が上端である。曲線が複数重なっているが、5往復の塗装なので、ボード

の同一位置は10回通過することとなり、10本の曲線が重なる。図4は熟練工11名のグラフを、図5は初心者11名のグラフを並べて表示したものである。図4はボードの下端と上端(グラフの左端と右端)200mm部分で急激に速度が上昇、もしくは、下降し、それ以外ではほぼ一定の速度となる台形状となっていることが全員に共通している。また、10本の曲線の形状も殆ど類似しており、ばらつきが非常に少ない。図5の初心者では、グラフ形状の個人差が非常に大きく、また、各個人における10本の曲線形状のばらつきが多い例が複数見られる。さらに、速度変化が少ない場合は、ボードの上端から下端まで塗装速度が遅い、逆に、速度が速い場合は、位置に依らず大きく速度が変動している結果である。これらから、ローラーの上下往復塗装における、熟練工共通の手の動作は、上下の端20cm部分から急激に減速もしくは加速し、それ以外の部分は概略一定の速度で塗装しているといえる。また、複数回の動作において、その動作は、殆ど変動していないことも確認できる。

5. まとめ

本研究では、塗装技能工11名と初心者11名のローラー塗装を対象として、作業時の筋活動とモーションキャプチャにより測定した動作を分析し、塗装技能工の動作の特徴を抽出した。

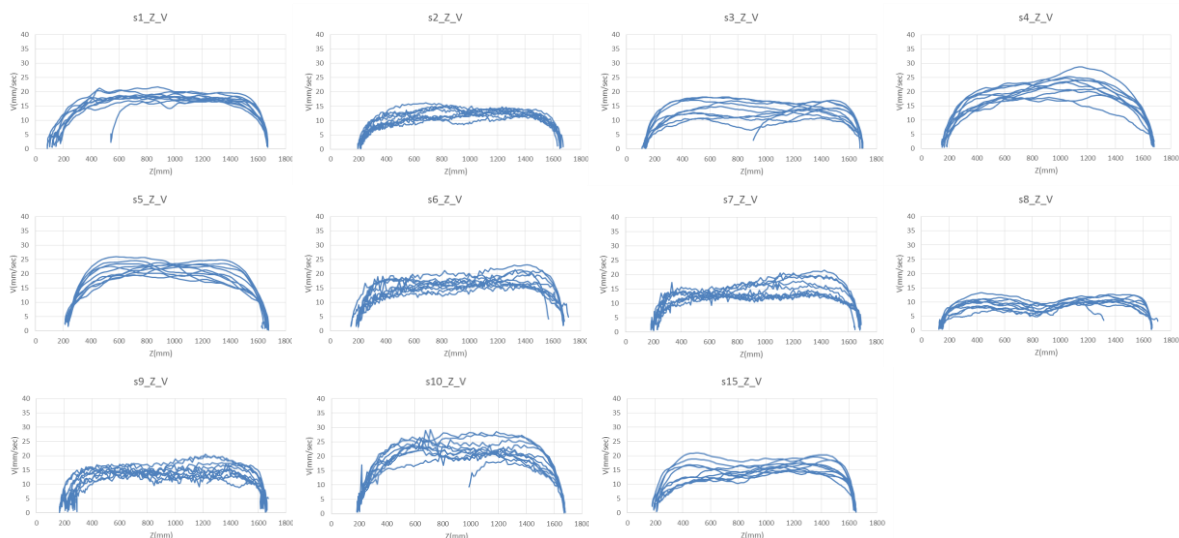


図4 タスク2におけるローラーの位置に対する速度の変化（熟練工）

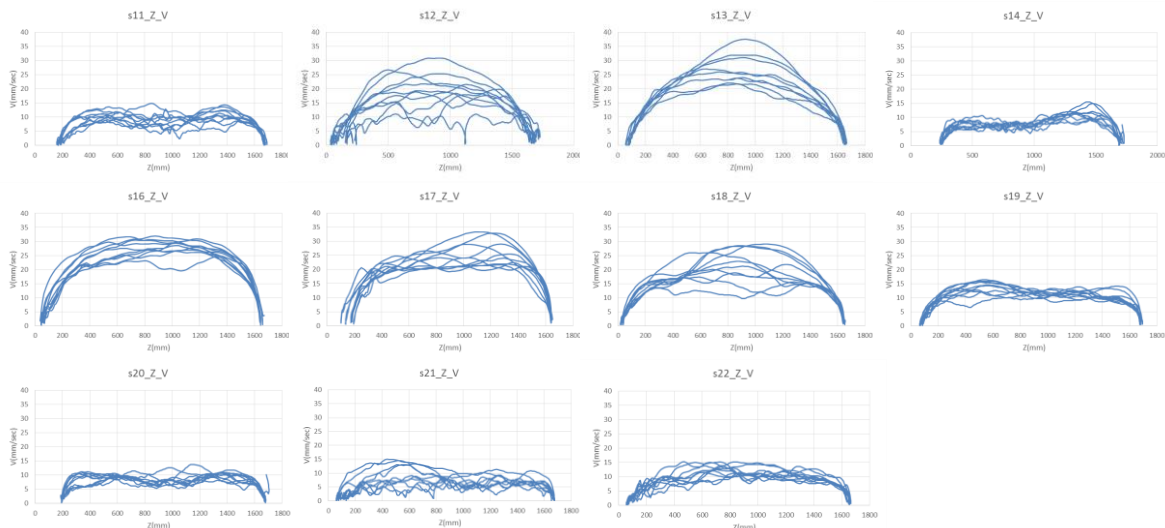


図5 タスク2におけるローラーの位置に対する速度の変化（初心者）

筋活動の観点から、技能工と初心者との間で統計的に有意差が認められたのは、ローラーを握る手の拇指内転筋であり、初心者は熟練工の約2倍程度の強い力で握っている結果であった。塗装作業の作業時間、手の動作の観点では、ボードの上端から下端までの往復塗装、ボード全面の塗装、何れも、熟練工は初心者の約75%の時間で塗装を完了している。

ボードの上端から下端までの5往復の塗装を対象とした、塗装位置とローラーを動かす速度との関係において、熟練工に共通するパターンを抽出することができ、上端および下端20cm程度までは、ほぼ一定の速度で塗装し、そこから端までの間で急激な加速もしくは減速が行われていること、複数回の塗装において、そのパターンは殆ど変化しない結果と

なった。今後、ローラーの位置と手首の角度、筋活動との関係なども抽出することにより、熟練工に共通するモデル動作の抽出を試みる予定である。

【参考文献】

- 1) 綿貫 啓一：バーチャルリアリティ技術による匠の技の伝承と人材育成, 精密工学会誌, Vol. 72, No. 1, pp46-51 (2006)
- 2) 三浦裕樹, 大澤哲史, 山本正信他：切断工具の製作工程における熟練手作業のモーションキャプチャ, 電気学会論文誌C, Vol. 134, No. 7, pp980-989 (2014)
- 3) 篠田之孝, 村上慎吾, 渡辺雄太他：モーションキャプチャを用いた日本舞踊の教育用動作解析システムの構築, 電気学会論文誌A, Vol. 131, No. 4, pp270-276 (2011)
- 4) 高井由佳, 後藤彰彦, 佐藤ひろゆき, 濱田泰以：熟練職人の形式知を取り入れた京壁塗り習熟 e ラーニング教材の構築, 教育システム情報学会誌, vol. 33, No. 2, pp84-93 (2016)
- 5) 宮本直和, 仲井朝美, 濱田泰以：組物職人による糸巻き動作のバイオメカニクスの研究, 人間工学, Vol. 42, (2006)