

速度・加速度・筋電情報の身体部位の動作軌跡への重畳による動作の可視化

—塗装熟練技能工の塗装時の手の動きを例に

砂田 治弥¹⁾ (非会員) 横山 清子¹⁾ (正会員)

松河 剛司²⁾ (非会員) (一社)日本塗装工業会技術委員会 (非会員)

1) 名古屋市立大学大学院芸術工学研究科 2) 愛知工業大学情報科学部

Motion Visualization by Superimposing Velocity / Acceleration / EMG on Motion Trajectory of Body Site

—An Example of Hand Movement During Painting by Skilled Painters

Haruya Sunada¹⁾(Non-Member) Kiyoko Yokoyama¹⁾(Member)

Tsuyoshi Matsukawa²⁾(Non-Member)

Technical Committee of Japan Painting Contractors Association (Non-Member)

1) Graduate School of Design and Architecture, Nagoya City University

2) Faculty of Information Science, Aichi Institute of Technology

アブストラクト

本研究では動作の可視化において、速度、加速度、筋活動などを反映して、特定部位の移動軌跡の太さや色に変化する手法の提案を目的とする。速度や加速度、筋活動は全身動作の外見から直感的に判断することは難しい。これらの情報は身体動作の制御に必要であり、動作の詳細な分析や、動作の学習のために有用である。全身の動きの映像に筋活動や関節角度、特定部位の軌跡を重畳表示する先行研究はあるが、本稿で提案するような軌跡の線の太さや色で、動きの速度や加速度、あるいは動作に伴う筋肉の活動度合を表現している動作の可視化方法と同様の例は無い。本稿では塗装技能工の技術伝承を適用事例として、可視化結果から熟練技能工の動作方法の特徴が抽出できること、初心技能工の教育用コンテンツへの活用の可能性を述べている。

Abstract

The purpose of this study is to propose a method of motion visualization to vary the thickness and color of the trajectory of the specific body site by reflecting the velocity, acceleration, muscle activity, etc. It is difficult to intuitively estimate the velocity, acceleration and muscle activity based on the appearance of whole-body motion. The information is necessary for controlling body movements, and are useful for detailed analysis of movements and learning of movements. There are previous studies that superimposing muscle activity, joint angles, and trajectories of specific body-site on motions of whole body, but there is no example that is the same as our proposal that represents the speed and acceleration of movement, or the degree of muscle activity by the thickness and color of the trajectory line. In this paper, the possibility of extracting features of the operation method of the skilled painters based on visualization and the utilization of the beginner to educational contents are described.

1. はじめに

スポーツの教育やトレーニング[1], バレエや新体操[2][3], 能や日本舞踊などの伝統芸能の伝承[4][5], 製造現場での技術教育や伝統工芸の職人技の伝承[6][7]など, 多様な場面で人の動作の教育や伝承が行われる. このような人の動作の教育や伝承のための有用な手段の一つとして, 人の動きの計測とその可視化がある.

人の動きの計測や可視化には, ビデオカメラで記録し実写として再生するものやモーションキャプチャにより測定した動作を3DCGアニメーション[8]やStick Figure[9]などを用いて再現するものがある. また人間の形をしたアバターなどを使った, 動きと同時に筋活動をアニメーションで再現する例もある[10][11][12]. これらの可視化は全身動作を直感的に把握すること, 全身の動作を総合的に理解することに適している. しかし, ビデオによる実写撮影のみでは身体各部位の3次元座標位置や筋活動などの定量値は測定できず, 特定部位に注目し, その動きの速さや加速度の変化, 動きに伴う筋活動など目に見えない特徴を詳細に理解することには適していない. 人間の形をしたアバターを用いた全身動作の再現においては, 特定部位の詳細情報を付加することで表現する情報量が増加し, 全身動作の総合的な把握と特定部位の詳細情報の理解を同時に満足させることは難しいと考える.

本研究では身体あるいは使用している道具の注目部位の動きの速さや加速度, 動きに伴う筋活動など目に見えない情報を部位の動作軌跡に重畳して提示する可視化方法の提案を目的とする. ビデオや3DCGにより全身の総合的な動きを可視化した場合, 動作の速さや加速度の変化, 筋活動の状態を直感的に理解することは難しい. 一方これらの情報は人が動作を行うために使用する筋肉や発揮する力の大きさ, あるいは動きの速度や力の制御方法の判断要因となる. 従って, 注目部位の速度や加速度, 筋活動の状態が直感的に理解できることは, 動作教育や動作伝承の効果向上や効率化に大きく寄与できると考える.

提案の可視化方法は, 軌跡の線の太さや色で, 動きの速度や加速度, あるいは動作に伴う筋肉の活動度合を表現する. 動作の可視化において, CGによる全身動作と注目部位の軌跡の表示[13]や, 軌跡に着目して解析する装置などもスポーツ分野では開発されてきている(ZEPP社: M-tracer). これらは特定部位の軌跡のみを表示しており, 軌跡に速度や加速度などの情報を重畳する表示方法では無い. 軌跡に速度と加速度の情報を重畳している例は, 筆者らの剣道動作を対象とした竹刀先端の軌跡に関して速度を線の太さ, 加速度を色で表現している例がある[14]が, それ以外は殆ど例が見られない.

本論文では2. で可視化システムの概要を述べ, 3. で可視化方法を塗装熟練技能工の動作分析へ適用した事例とアンケートによる可視化手法の評価結果を述べ, 4. で提案可視化方法に関する考察を行っている.

2. 可視化方法

2.1 概要

提案の可視化方法は, モーションキャプチャで測定した注目マーカの3次元空間内での軌跡を表示するものである. 軌跡の太さや色の変化により, 対象マーカの速度や加速度の変化, 注目する筋肉の筋活動の度合いを軌跡の座標に対応させて描画する. モーションキャプチャにより測定した全身の動作と同期させた動画表示も可能である. 図1は(a)に示すローラブラシを用いたボード全面塗装を対象として, 全身に装着したマーカを点で表し, 塗装動作におけるローラブラシを握る手の甲のマーカの軌跡を描画している例を(b)示す.

可視化プログラムの作成には, C++言語および, ライブラリとしてOpenFrameWorks, OpenGLを使用する. 開発環境は, Visual Studio 2015(Microsoft)を使用する.

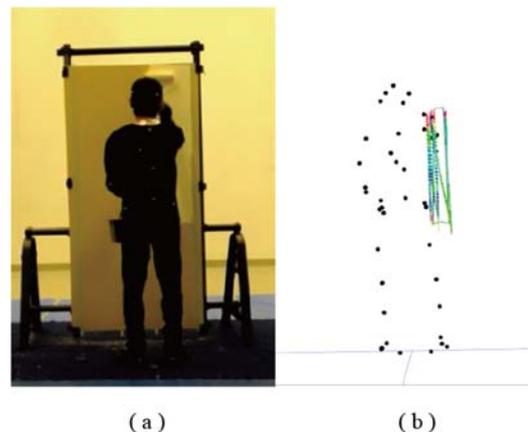


図1. (a)ローラブラシによるボード全面塗装の様子と (b)ローラブラシを握る手の甲のマーカの軌跡描画例.

2.2 速度と加速度の可視化

速度 $v(t)$ は1フレーム分のマーカの移動距離に基づき式(1)で計算する. 同様に, 加速度 $a(t)$ は $v(t)$ の1フレーム分の差分に基づき式(2)で計算する.

$$v(t) = \frac{\sqrt{(x(t) - x(t-1))^2 + (y(t) - y(t-1))^2 + (z(t) - z(t-1))^2}}{\Delta t} \quad (1)$$

$$a(t) = v(t) - v(t-1) \quad (2)$$

ここで $(x(t), y(t), z(t))$ は, 軌跡の描画マーカの時刻 t における三次元座標である.

1フレーム毎に球を描画することで軌跡を表示する. 球の半径に速度情報を, 球の描画色に加速度情報に割り当てる. 速度情報 $v(t)$ について, 可視化の対象となるマーカの最大速度 V_{max} に対する球の半径を R_{max} として, フレーム毎の球の半径 $r(t)$ は, $R_{max} \times v(t)/V_{max}$ で描画する(図2). これにより対象とする描画時間内における, マーカの相対的な速度変化が表現できる. 速度の大きさが球の大きさ(半径)で表されているため, 軌跡の



図2. 時間 t_1 における座標 $(x_1(t_1), y_1(t_1), z_1(t_1))$ を球の中心, 半径を時間 t_1 の速度 $v(t_1)$ としたマーカの可視化.

太さの変化として速度変化を直感的に把握することが可能となると考える.

- 加速度の球の描画色への割り当て方法は, 以下の通りである.
- 1) 可視化対象データ毎に加速度 $a(t)$ の標準偏差を算出する.
 - 2) 複数データの可視化結果を比較する場合, 比較対象データそれぞれの標準偏差の平均値を算出し, ここでは $\bar{\sigma}$ とする.
 - 3) $-2\bar{\sigma}$ から $2\bar{\sigma}$ の加速度の値を色相値210から0へと割り当てる.
 - 4) 加速度 $-2\bar{\sigma}$ から $2\bar{\sigma}$ と色相210から0をそれぞれ20分割し値を対応させる. 従って例えば加速度 $-2.0\bar{\sigma} \sim -1.8\bar{\sigma}$ の適合色相値は210, $-1.8\bar{\sigma} \sim -1.6\bar{\sigma}$ の適合色相値は200, $\dots 1.8\bar{\sigma} \sim 2.0\bar{\sigma}$ の適合色相値は0となる.

図3にAcc.で表す加速度とHueで表す色相との関係を示す. 加速度は速度制御のための参考情報となるため, 直感的に強弱が認識しやすい色彩の変化への反映が適していると考ええる.

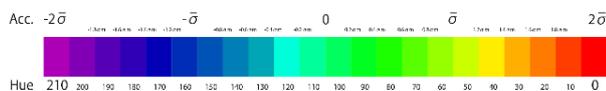


図3. $-2\bar{\sigma}$ から $2\bar{\sigma}$ の加速度の値に対応する色相図.

2.3 筋電情報と加速度の可視化

筋電は筋肉の収縮に伴う活動電位であり, 筋活動の大きさがその振幅に反映される. 従ってある時間区間内の積分筋電が, 筋活動の大きさを評価する指標として用いられる [15]. 積分筋電は測定筋電に対して全波整流を行い, 設定した時間区間内の和, もしくは平均値として算出する.

筋電情報と加速度の可視化は, 積分筋電の値を球の半径に割り当て, 色情報については積分筋電図が設定した閾値を越えた時のみ加速度の正負の差を2色の有彩色で色分けして描画する.

積分筋電は個人差および個人内での筋肉部位の差による変動が大きい. 従って筋活動の大きさの個人差や部位の差に影響されずに, 動作の変化に対する積分筋電図の変動のみを可視化することを可能とするため, zスコアを用いる. zスコアは各個人の筋肉部位それぞれにおいて, 可視化対象時間区間内の積分筋電の変動の平均値をゼロ, 標準偏差を1とするものである. 元データの平均値と標準偏差を求め, 各データからその平均を引き, 標準偏差で除すことで算出する. これにより可視化対象時間区間の積分筋電の平均値と標準偏差は, 個人間および個人内で等しくなる. このzスコアに対して, 解析対象時間区間内の最小値が0となるようにバイアス値を加えて, すなわち全ての

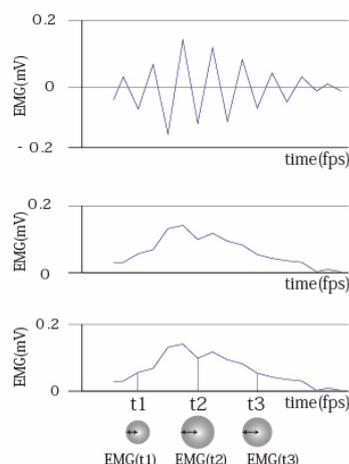


図4. 筋電図の可視化方法 筋電図 (上), 積分筋電図 (中), t_1, t_2, t_3 におけるEMGの可視化(下)の例.

値が正となるようにして, 描画する球の半径に割り当てる. 図4に割り当て方法の模式図を示す.

球の色情報について, 積分筋電図が平均値を越えた時に有彩色で塗り潰し, それ以外は黒で描画する. 色は加速度が正, すなわち加速時は赤色, 加速度が負すなわち減速時は青とする.

3. 塗装動作分析への提案の可視化方法の適用

3.1 可視化データの概要

熟練塗装技能工の塗装動作を初心塗装技能工に伝承するための教育用コンテンツにおいて, 提案の可視化方法を応用することを将来的に目指している. ここでは11名の熟練塗装技能工と11名の未経験者の, 塗装動作への提案手法の適用事例を述べる.

対象とした動作は, 横910mm×1820mmのボード全体をローラブラシにより塗装する. 図5に示すローラブラシは, 比較的面積の広い場所の全面塗装に用いられる. 実験参加者は, 熟練塗装技能工として, 身長158cm~177cm, 右利き, 塗装歴15年以上, (一社)日本塗装工業会技能検定取得者の男性と, 比較対象として塗装未経験の身長163cm~180cm, 右利き, 男子大学生とする.



図5. 実験に使用したローラブラシ.

筋電計を装着した後, モーションキャプチャマーカを貼付した測定用スーツを図1(a)に示す塗装者のように着用して塗装を行う. 塗装は各自のペースで, 自身が完成したと判断するまで行うものとした. ローラへ塗料を含ませるタイミングも各自の

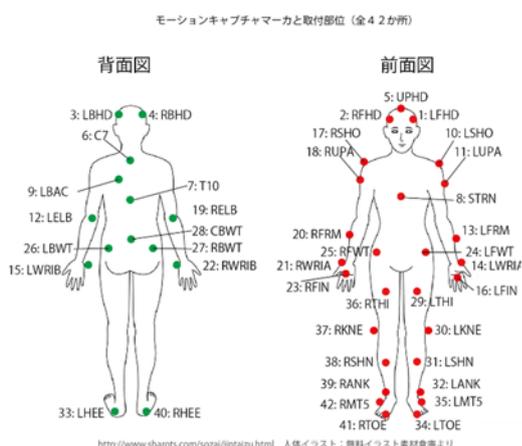


図6. モーションキャプチャのマーカの装着位置.

判断で自由に行うものとする。

動作データの計測は、光学式モーションキャプチャシステム Mac3D System, カメラKestrel 10台構成(ナックイメージテクノロジー)を用いる。実験参加者に装着する反射マーカは、主要な関節部分などを中心とする、基本の44カ所のマーカから胸部の左右につける2カ所のマーカを取り除いた計42箇所に装着する。マーカの装着位置を図6に示す。これは胸部部分のマーカが実験におけるカメラ位置の関係により、カメラの追跡から消失しやすく、エラーの原因となるためである。カメラのフレームレートは秒間50フレーム (50fps) で測定している。

筋電図は多用途テレメータ筋電計DL-5000 (S&ME) で測定する。被験筋は僧帽筋、上腕二頭筋、橈側手根屈筋、腕橈骨筋、

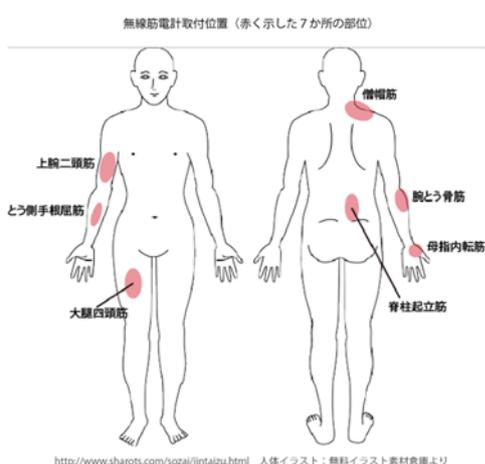


図7. 筋電図の測定部位(上)と電極(下左)と筋電計(下右)装着例

母指内転筋、大腿四頭筋、脊柱起立筋の7箇所を対象とする。筋電図の装着部位を図7に示す。筋電図は1kHzでサンプリングし、時定数は0.03秒、商用電源からのノイズ除去のための60Hzバンドストップフィルタを適用する。

本研究は名古屋市立大学大学院芸術工学研究科研究倫理委員会(芸倫2016-1)の承認を得て実施している。

3.2 可視化事例

可視化対象データは、塗装動作開始時点から終了時点までの測定データにおいて、バケツからローラブラシに塗料を含ませる動作部分を削除し、塗装動作のみを抽出した。ローラブラシを握る右手の中指付け根のマーカの移動軌跡と速度、加速度、および積分筋電を可視化した。

図8は1名の熟練技能工の(a)速度・加速度情報と(b)加速度・筋電情報を可視化した正面図である。ボードの下半分と上半分を分けて塗装していることが一目で理解できる。(a)に示す速度・加速度情報の可視化では折り返しの地点に近づくにつれ軌跡が細くなり色情報が青へ近づき、その後折り返し地点を過ぎると赤へと近づくことがわかる。(b)に示す加速度・筋電情報の可視化では、ローラブラシを折り返す地点以外では筋電の値が微少であることがわかる。折り返し地点は上から下へ折り返す場合と下から上へ折り返す場合では色情報に違いがあることが分かる。

図9と図10に軌跡の一部を楕円囲みで示しているボード下端でのローラブラシ折り返し時点の軌跡を拡大表示したものを示す。図9が速度と加速度の可視化、図10が加速度と積分筋電の可

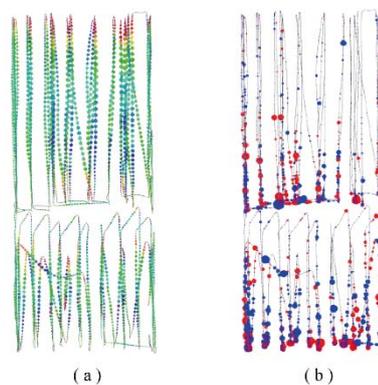


図8. 1名の熟練技能工の(a)速度・加速度情報と(b)加速度・筋電情報の可視化結果の正面図

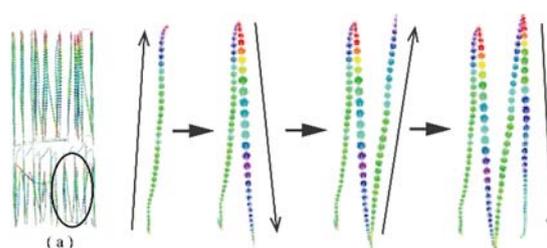


図9. 速度・加速度情報を可視化したものの楕円部の拡大図。

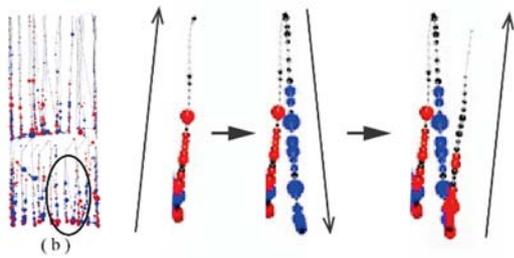


図10. 加速度・積分筋電情報を可視化したものの楕円部の拡大図。

視化結果である。これを見ると上から下へ折り返す場合は主に青くなる、つまり折り返しにおいて加速度が減速に働いており、力にブレーキをかけていることがわかる。逆に下から上へローラを動かす場合の折り返し地点では、赤い表示になっており、これは下から上への加速に力を使っていることがわかる。

次に軌跡の形状について、測定対象である11名の熟練者および11名の未経験者全員の可視化結果を比較すると、軌跡の形状は主に図11に示す3種類あり(a)「上から下まで一筆で塗る」、(b)「上と下など分割し塗る」、(c)「上下方向だけではなく水平方向への動作も加えて塗る」である。なお水平方向のジグザグの軌跡は、未経験者では見られなかった。この動作は塗装技能検定教科書[16]に記述されている「直ちに仕上げるためにむらを切りなおすとよい」に対応する動作で、指導もしくは経験に基づき会得する動作であることが分かる。熟練工については11名のうち「上から下まで一筆」が3名、「上下に2分割」が4名、「水平方向の動作でむらを切る」が3名、「3段に分割」が1名であった。未経験の被験者11名のうち「上から下まで一筆」が6名、「上下に2分割」が4名、「3段に分割」が1名であった。可視化結果から熟練者間における塗装動作の個人差を明らかにすることができた。

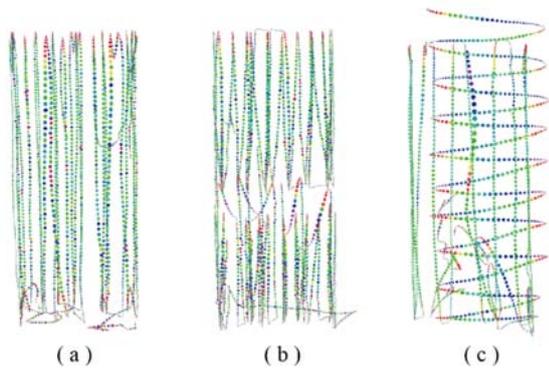


図11. 熟練技能工の3種類の塗装軌跡

(a)「上から下まで一筆」の塗装軌跡 (b)「上下に2分割」の塗装軌跡 (c)「水平方向の動作でむらを切る」塗装軌跡

図12に(a)1名の熟練者と(b)1名の未経験者の速度と加速度の可視化結果を示す。同様に図13に加速度と積分筋電の可視化結果を示す(a). 熟練者と(b)未経験者の軌跡の垂直方向の線の太さ、すなわち手の移動の速さに着目すると、未経験者と比較して熟練工の方が平均的に軌跡の線が太く、塗装速度が速いこと

が確認できた。

例えば熟練者は折り返し付近以外、一定速度で塗装するため、速度を現す円の大きさが一定となることで軌跡の太さが一定になるが、未経験者は速度のばらつきが大きく軌跡の太さが一定にはならない。これについて、速度の変動係数(標準偏差を平均値で除した値:単位%)に着目すると、熟練者11名と未経験者11名、それぞれの中指付け根マーカの速度の変動係数は、熟練者は52.2%、未経験者は62.3%となっており、 $p<0.01$ で有意差が認められている。この例のように、提案の可視化方法は動作の定量解析に先立つ動作の特徴の把握にも有用と考えられる。

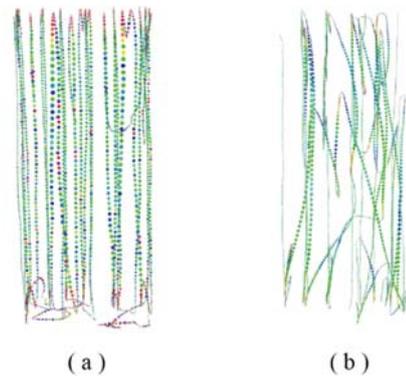


図12. 熟練者と未経験者の軌跡の比較 (速度・加速度)。(a)熟練者 (b)未経験者

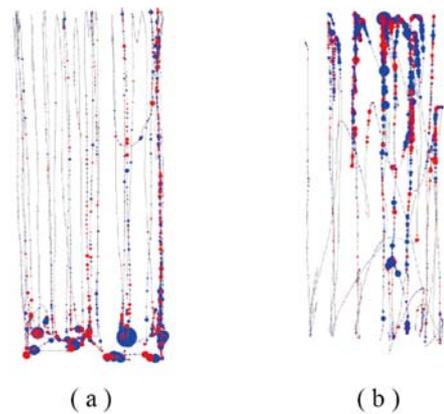


図13. 熟練者と未経験者の軌跡の比較 (加速度・積分筋電)。(a)熟練者 (b)未経験者

3.3 可視化方法に関する評価アンケート

提案の可視化方法の意図した情報の伝達可能性と初心塗装技能工の教育用コンテンツとしての利用の可能性を評価するためにアンケートを実施した。アンケートの回答者は塗装業の経営者と塗装技能工を合わせた15名である。年齢30~39歳1名、40~49歳6名、50~59歳6名、60~69歳2名である。評価対象の映像は図12に示す速度・加速度の可視化、図13に示す加速度・積分筋電の可視化、曲線による手の軌跡の可視化とビデオ映像の4種類である(図14)。Webアンケートとして実施したため、回答者は動画に対する視点の変更や拡大縮小などは行わないものとして映像により提示した。質問項目は表1に示す7項目とし、それぞれを5段階(1:もっともわかりにくい~5:もっともわかり

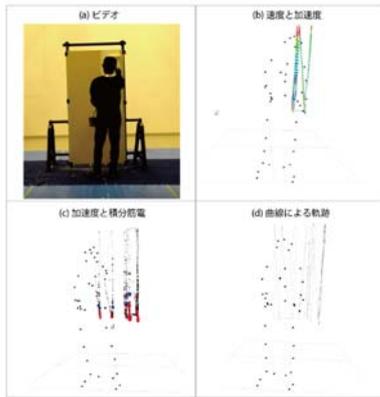


図14. アンケートに用いた動画のスクリーンショット

表1. アンケートの質問項目

質問項目	
1.	速度が理解しやすいかどうか？
2.	腕の力の入れ方がわかりやすいかどうか？
3.	手の動かし方がわかりやすいかどうか？
4.	手の動きの速度の変化はわかりやすいかどうか？
5.	筋肉の活動の変化の仕方は理解しやすいかどうか？
6.	身体全体の動作は理解しやすいか？
7.	自分が動作を学ぶことを想定したときに、参考にしたいとおもうか？

やすい)で回答を求めた。また、それぞれの映像について長所と短所を記述式に質問した。さらに4手法の中で最も参考にしたい映像と2番目に参考にしたい映像を質問した。

図15(a)ビデオ, (b)速度と加速度, (c)加速度と積分筋電, (d)曲線による軌跡の結果を示す。棒グラフは上から「1.速度の理解」「2.腕の力の入れ方」「3.手の動かし方」「4.手の動きの速度変化」「5.筋肉の活動の変化」「6.身体全体の動作」「7.動作を学ぶ時に参考にしたいか

ぶ時に参考にしたいか」の7項目の質問に対する回答分布を色で示している。1が濃い青色, 2が薄い青色, 3が灰色, 4が薄いオレンジ色, 5が濃いオレンジ色で示されている。(a)ビデオでは「1.速度の理解」(4,5回答者73.3%), 「6.身体全体の動作」(4, 5回答者53.3%)で4と5の回答者が50%を超えた。(b)速度・加速度の可視化では「1.速度の理解」(4, 5回答者93.4%), 「3.手の動かし方」(4, 5回答者80%), 「4.手の動きの速度変化」(4, 5回答者86.7%)で4と5の回答者が50%を超えた。(c)加速度と積分筋電では「1.速度の理解」(4, 5回答者80%), 「2.腕の力の入れ方」(4, 5回答者60%), 「3.手の動かし方」(4, 5回答者60%), 「4.手の動きの速度の変化」(4, 5回答者66.6%), 「5.筋肉の活動の変化」(4, 5回答者53.3%)で4と5の回答者が50%を超えた。(d)曲

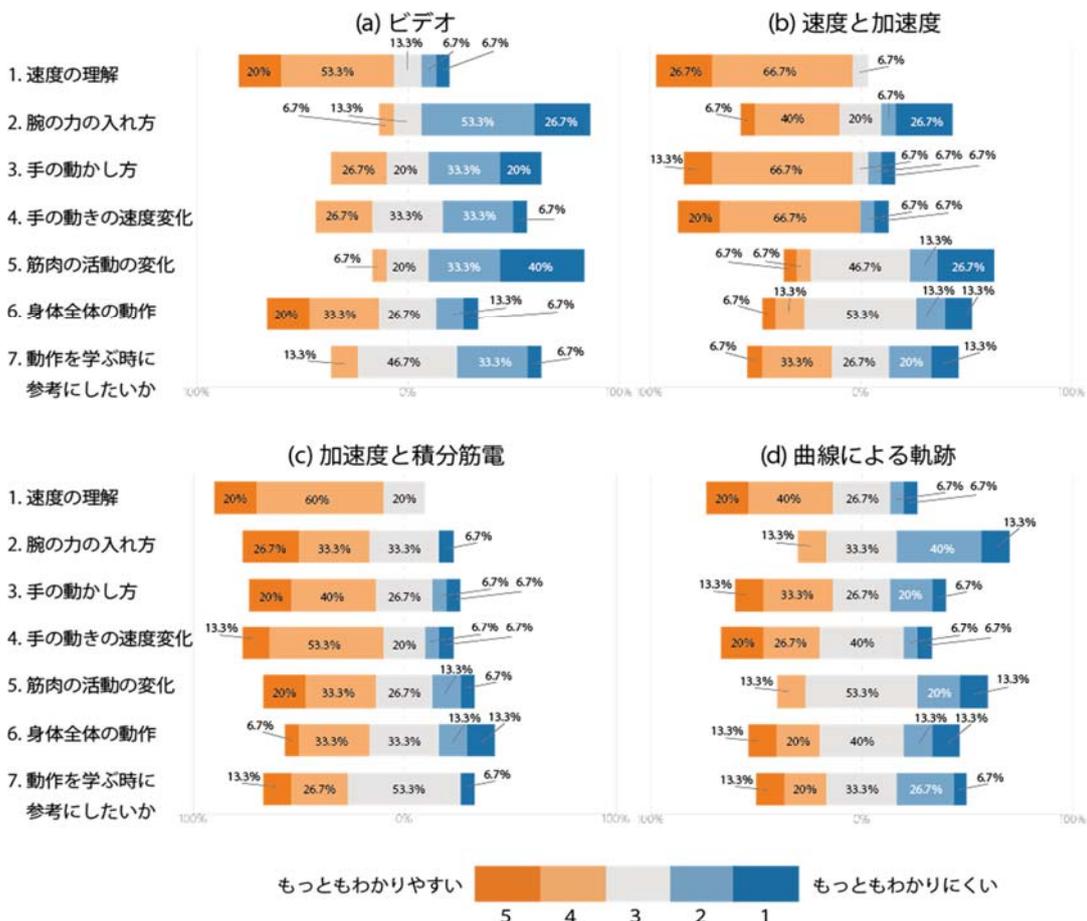


図15. (a)ビデオ,(b)速度と加速度,(c)加速度と積分筋電,(d)曲線による軌跡 のアンケート回答結果 (回答者15名)

線による軌跡では「1.速度の理解」(4, 5回答者60%)のみで4と5の回答者が50%を超えた。

ビデオの長所は塗装作業全体の流れがとらえやすい, 身体全体の動きがわかりやすいという意見が多く, 短所は手元が見えないという意見であった。(b)速度・加速度の可視化の長所はローラの動きがわかりやすい, 速度や速度変化が理解しやすいといった意見であり, 短所は色と点が多すぎてわかり辛い, 身体全体の動作が想像し辛いため実写映像と同時に表示されると良いといった意見であった。(c)加速度と積分筋電の可視化の長所は力を入れる位置や力の配分がわかりやすいという意見が多く, 短所は特定部位の筋活動だけでなく他の部位も同時に確認できると良い, 身体の動きを示すマーカと軌跡が重なるとわかり辛いので軌跡の色を工夫すると良い等の意見であった。(d)曲線による軌跡の長所は塗る順番や重なり回数が理解しやすいという意見が多く, 短所は情報が少なくモーションキャプチャを使用しているメリットが感じられない, 速度や力の強弱が理解できない等の意見であった。

回答者が最も参考にした映像はビデオ20%, 速度・加速度の可視化27%, 加速度・積分筋電図の可視化47%, 曲線による軌跡の可視化7%であった。2番目に参考にした映像はビデオ19.9%, 速度・加速度26.6%, 加速度・積分筋電図26.6%, 曲線による軌跡26.6%であった。

4. 考察

提案の可視化方法は, 特定部位の移動軌跡に, 移動速度, 加速度, 動作に伴う筋活動を重畳表示するものである。技能伝承やスポーツ教育で活用される動作教育システムでは, 3DCGやVR, 実写による身体形状により, 姿勢や動きを提示するものが一般的である[1]-[9], [13]。アンケート結果について3.3節で述べたように, 身体形状による姿勢や動きの提示の例としての実写と提案手法の比較において, 「6.身体全体の動作」がわかりやすい(評価4と5)と回答している割合が実写で58.3%, 速度・加速度の可視化では20%, 加速度・積分筋電図の可視化では40%となり身体形状による動きを表現する方が全身の動きの理解には適している。「1.速度の理解」のしやすさはビデオ, 提案の可

視化2手法いずれも回答者の50%以上が分かりやすいとしており, 特に速度・加速度の可視化では93.4%, 加速度・積分筋電図の可視化では80%が分かりやすいと回答している。「3.手の動かし方」と「4.速度変化」は提案2手法は80%, 86.7%と60%, 66.6%と50%を超えているが, ビデオでは何れも26.7%である。これらから身体形状により姿勢や動作を提示する手法は身体全体の動きを分かりやすく提示できる点で提案手法より優れているが, 特定部位の速度変化や動かし方を理解するには提案手法が適していると言える。

身体形状に筋活動を重畳して提示する方法として[10][11]が提案されている。これらと特定部位の軌跡に筋活動を重畳する提案方法を比較すると, 身体形状に筋活動を重畳する方法では, 複数筋肉の活動を同時に確認でき, 提案方法では一か所の特定部位の筋肉の活動を部位の位置と同時に軌跡として確認できる。軌跡の描画対象の筋肉はユーザがあらかじめ指定できる仕様としている。アンケートにおいて, 速度の分かりやすさ, 腕の力の入れ方, 手の動かし方, 動きの速度の変化, 筋肉の活動の変化について, 回答者の50%以上が4と5を回答している。提案方法は動きの速度の変化, 筋肉の使い方など部位を特定した詳細な動作の理解に適していると考えられる。

身体の動作と特定部位の軌跡を表示する例は少ない[12][13]。[12]では, 軌跡のみの描画で, 速度, 加速度, 筋活動などは重畳していない。[13]は, 軌跡の速度と加速度を重畳することを提案しているが, 筋活動は重畳していない。アンケートにおいて, 筋肉の活動の変化(使い方の理解)について, 加速度と積分筋電図による可視化では53.3%が理解できたと回答しており, 他の3手法は6.7%, 13.4%, 13.3%しか理解できたと回答していないことと比較して, この可視化手法は筋肉の使い方の理解に寄与していると考えられる。またこの可視化手法は, 比較した4映像の中で最も参考にした映像として選択している回答者が47%で, 他の3手法より評価が高い。対象とした塗装動作において, 塗る位置に対する力の制御の仕方を軌跡として残す方法は, 他の3手法と比較して, 塗装動作を理解するために適していると考えられる。これまでに述べてきた内容を, 比較対象とした従来の可視化手法の概略, 対応する参考文献番号, それぞ

表2. 可視化手法による特徴の比較

方法	文献番号	特徴
身体形状による姿勢や動きの再現	[1]-[9],[13]	全身の動きは理解しやすい 特定部位の力の入れ方, 速度の変化の理解は難しい
身体形状に筋活動を重畳して動きを再現	[10][11]	全身の動きと総合的な全身の筋肉の使い方は理解しやすい 特定部位の動かし方や筋肉の使い方の理解は難しい
全身動作の再現と軌跡(情報の重畳無)を提示	[12][13]	特定部位の動かし方(塗装の場合の塗る手順や位置)は理解しやすい 特定部位の動作のための速度制御の方法や筋肉の使い方の理解は難しい
軌跡に速度と加速度を重畳		特定部位の速度の制御方法や動かし方が理解しやすい 全身の総合的な動作の理解が難しい
軌跡に加速度と積分筋電を重畳		特定部位の筋肉の使い方や速度制御など詳細な動作が理解しやすい 全身の総合的な動作の理解が難しい

れのアンケートに基づく特徴を表2にまとめている。

5. まとめ

本稿では身体あるいは使用している道具の注目部位の動きの速さや加速度、動きに伴う筋活動など目に見えない情報を部位の動作軌跡に重畳して提示する可視化方法を提案し、塗装動作に対する適用事例と塗装業の経営者および塗装技能工による評価結果に基づく可視化方法の特徴を述べた。塗装動作への適用事例においては、特定部位に注目した速度変化や力の制御方法などの詳細な動きの理解が可能であること、ビデオ、速度・加速度の可視化、加速度・積分筋電図の可視化、曲線による軌跡の可視化を比較すると、加速度・積分筋電図による可視化が動作習得における支援への活用の可能性に対する評価が高い結果であった。

今回、速度と加速度の可視化では、速度を軌跡の描画点の大きさ(円の半径)、加速度を描画色に対応させた。加速度と積分筋電図の可視化では、積分筋電図を描画点の大きさ、加速度は加速と減速を二色で色分けしている。この描画方法については、提案方法の応用内容や対象ユーザに応じて、今後検討する必要があると考えている。また、加速度の大きさを色の変化で表現したが、動作のどの特徴を色に対応させ、その対応方法として何が適切かなどは検討の必要があると考えている。さらに、これまで一般的に利用されている全身像による動作の可視化と、提案方法を用いた場合の、それぞれの特徴や有用性の比較についても、応用内容や対象ユーザを特定した上での比較検証実験が必要である。

付録

可視化プログラムのインターフェース

可視化プログラムのインターフェースとして、マウス操作による三次元空間内のカメラの位置、角度のインタラクティブ操作を付加している。左ボタンのドラッグ操作により画面の回転(rotate)、中ボタンのホイール操作により拡大縮小(zoom)、右ボタンのドラッグ操作により平行移動(pan)を行うことができ、ショートカットキーによりカメラ位置を固定値に移動することも可能である。図16に左上の軌跡を原画像として、拡大、平行移動、回転を行った例とそのマウス操作を示す。

謝辞

本稿で適用事例として述べた塗装技能工を対象とした動作測定実験に際して、実験の実施、動作データの編集など、多大な支援をいただいた、2016年度名古屋市立大学芸術工学部卒業生森田智子氏に記して謝意を表します。測定実験に際して、通常業務で多用の中を全国から集まっていたいただいた熟練塗装技能工の皆様に厚く感謝申し上げます。

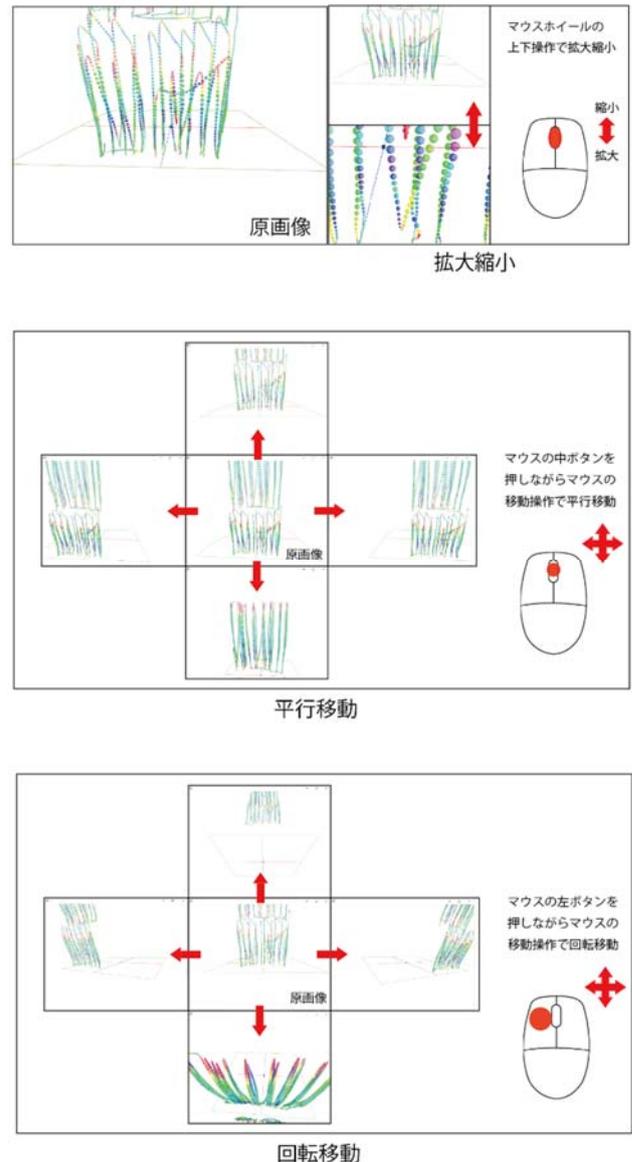


図16.原画像の拡大、平行移動、回転処理の例とそのマウス操作

参考文献

- [1]稲尾, 尾下, 向井, 栗山, モーションキャプチャを用いたスポーツフォーム練習のための特徴量,可視化手法の検討, 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.2016-CVIM-204, No.21, pp.1-7, 2016.
- [2]川畑, 源田, スマートフォンを活用した舞踊教育のための身体動作の検討, 組込みシステムシンポジウム2013論文集, Vol.2013, pp.169-170, 2013.
- [3]曾我, 明神, モーションデータをを用いた新体操ルール学習支援システムの試作と評価, 映像情報メディア学会誌, Vol.62, No.2, pp.222-226, 2008.

[4]岩月, 山中, 大塚, 中司, 柳瀬, 能の型付資料に基づく所作単元の分析と舞の3Dアニメーション合成, 情報処理学会研究報告人文科学とコンピュータ, 研究報告人文科学とコンピュータ, Vol.2011-CH-91, No.7, pp.1-8, 2011.

[5]篠田, 村上, 渡辺, 三戸, 渡沼, 丸茂, 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, pp.270-276, 2011.

[6]三浦, 大澤, 山本, 羽賀, 鈴木, 野水, 長谷川, 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, pp.980-989, 2014.

[7]安藤, 住川, モーションキャプチャと仮想空間を利用した鋸引き動作観察教材の開発と機能評価, 日本教育工学会論文誌, Vol.36, No.2, pp.103-110, 2012.

[8] F. Multon, L. France, M.P. Cani-Gascuel, G. Debunne, Computer Animation of Human Walking: A Survey, The Journal of Visualization and Computer Animation, Vol.10, No.1, pp. 39-54, 1999.

[9] M. G. Choi K. Yang T. Igarashi J. Mitani J. Lee, Retrieval and Visualization of Human Motion Data via Stick Figures, Computer Graphics Forum, Vol.31, No.7, pp. 2057-2065, 2012.

[10] 松河, 横山, 梅谷, 永田, モーションキャプチャと3DCGを用いた動作解析システム, 人間工学, Vol.45, No.1, pp.12-18, 2009.

[11]十河, 逸見, 吉澤, 南部, 平山, 動作解析を用いた野球打撃動作における技術差の定量比較, 電気学会論文誌C, Vol.137, No.1, pp.60-67, 2016.

[12] A. Qi, 柳井, 中川, 温, 山川, 山下, 浅間, 実映像と筋活動の重畳表示によるローイング動作教育システム, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.834, DOI:10.1299/transjsme.15-00424, 2016.

[13]稲葉, 瀧, 宮崎, 長谷川, 肥田, 山本, 北川, スポーツ動作分析の支援を目的とした人体センシング情報の可視化提示法, 芸術科学会論文誌, Vol.2, No.3, pp.94-100, 2003.

[14] H. Sunada, K. Yokoyama, T. Hirata, T. Matsukawa, H. Takada, Visualization system for the information measured by motion capture system, Proc. IEEE ICCSE 2016, DOI:10.1109/ICCSE.2016.7581548, 2016.

[15]瀬尾, 小木, 表面筋電図の人間工学応用, 労働科学研究所出版部, 2004.

[16](一社)日本塗装工業会技能委員会, 六訂新しい塗装の知識, 斯文書院, 2013.

砂田 治弥



2002年名古屋市立大学芸術工学部卒業。2004年名古屋市立大学大学院芸術工学研究科博士前期課程修了。2020年名古屋市立大学大学院芸術工学研究科博士後期課程単位満了。同年愛知文教女子短期大学助教。コンピュータグラフィックス, Webデザインに興味を持つ。

横山 清子



1982年名古屋工業大学情報工学科卒業。1984年名古屋工業大学情報工学専攻修士課程修了。同年豊田工業高等専門学校助手。1994年名古屋市立女子短期大学助教授, 1996年名古屋市立大学芸術工学部助教授, 2009年より同大学大学院芸術工学研究科教授。生体信号処理, 生体情報の可視化に興味を持つ。IEEE, 人間工学会, 芸術科学会, 他会員。

松河 剛司



2005年名古屋市立大学芸術工学部卒業。2010年名古屋市立大学大学院芸術工学研究科博士後期課程修了。同年愛知工業大学情報科学部助教。2015年同大学情報科学部准教授。現在准教授。生体信号の可視化, コンピュータグラフィックスに興味を持つ。人間工学会, 芸術工学会, 他会員。

(一社)日本塗装工業会技術委員会

委員長: 宮木章吉, 副委員長: 西浦建貴, 峯本正直, 乃一剛英, 島村元章, 村木克彦, 津田修。