

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11966

研究課題名(和文) 認識および動作制約を利用した手作業における熟練技能の解明

研究課題名(英文) Understanding Proficiency Skills in Handwork Using Motion Constraints

研究代表者

山野辺 夏樹 (Yamanobe, Natsuki)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員

研究者番号：90455436

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、手作業における熟練技能を明確化し保存・継承できる形で形式知化することを目標とする。手先にかかる反力に応じて動きを細かに制御する必要があり、編み目形状等の外観から巧拙評価が可能な編み物を対象として技能解析とモデル化を行った。編み目形状の均質さに基づく巧拙の評価指標を提案し、手先動作と視覚情報の解析から、糸を引く動作が重要であり、糸の引き量と引く方向、力を一定にする必要があることを示した。また編み動作を複数の単位動作に分割してLSTMで学習し、動作モデルによる計測データの自動分節化を可能とした。これにより、熟練者との比較と訓練の促進に貢献する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

少子高齢化社会を背景として、労働人口の減少は日本社会に様々な問題を引き起こしている。伝統工芸をはじめとする手工業分野における技術継承の課題もそのうちのひとつである。技能的な側面を学ぶためには、見て・做って・訓練して、という熟練者の技術を実際に学ぶ過程が重要であるが、熟練者の高齢化が進み直接的な技能継承の機会が急速に減少しているのが現状である。本研究は、学習者独自のトレーニングを可能とする熟練技能のアーカイブに貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：This study aims to clarify proficiency skills in handwork and to formalize them in a form that can be preserved and passed on. We conducted skill analysis and modeling of knitting, which requires detailed control of movements in response to reaction forces applied to the fingertips and for which skill evaluation is possible based on the appearance of the knitting pattern and other visual factors. We proposed evaluation values based on the homogeneity of the knit shape and showed that the yarn-pulling motion is important and that the amount, direction, and force of yarn-pulling must be constant based on the analysis of hand motions and visual information. The knitting motion was divided into multiple unit motions and learned by LSTM, enabling automatic segmentation of the measurement data by the motion model. This contributes to the comparison with skilled workers and the facilitation of training.

研究分野：ロボット工学

キーワード：技能継承 動作解析 形式知化 動作モデル

1 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

少子高齢化社会を背景として、労働人口の減少は日本社会に様々な問題を引き起こしている。伝統工芸をはじめとする手工業分野における技術継承の課題もそのうちの一つである。技能的な側面を学ぶためには、見て・倣って・訓練して、という熟練者の技術を実際に学ぶ過程が重要であるが、熟練者の高齢化が進み直接的な技能継承の機会が急速に減少しているため、学習者独自のトレーニングを可能とする熟練技能のアーカイブ（情報蓄積と活用）は急務である。

2. 研究の目的

本研究では、認識と動作の連動が重要な手作業である編み物を対象として、その技能を明確化して保存・継承できる形で形式知化することを目指す。具体的には、技能レベルを示す評価基準の構築、技能要素の解析・抽出、学習者の訓練を可能とするための動作のモデル化といった、熟練技能アーカイブのための一連の手順を示す。

3. 研究の方法

編み物は趣味としても嗜まれる身近に体験できる手作業技術の一つである。作品全体や編み目の形状から出来栄の巧拙の判断が容易であることから、技術の定量的な評価対象として扱われることも多い。例えば、森らは、様々な編み目模様に対する画像解析と官能評価に基づき作品の巧拙の評価指標を示している [1]。しかし、作成過程の人の動作が作品の巧拙に与える影響に関しては明らかにされておらず、技能継承という観点での議論は不十分である。

本研究では、動作と作品の巧拙の関連性を明確にするため、一本の編み棒で編み進める「かぎ針編み」を選択し、芸術的側面を含む柄編みではなく、基本的な編み方の一つである「細編み」に着目することにした。細編みは編み目が細かく密度が大きいという特徴があるため、作品の巧拙が明確である。図 1 に編み目構造を示す。赤色部分は編み目の表目、青色部分は裏目を表す。複数の編み目が展開している面を xy 平面とすると、表目と裏目は xy 平面に対して対称系であり、 z 軸方向から見た時に同じ外観となる。図 2 に細編み一目を編む動作を示す。図 2 の編み目は、図 1 の編み目を z 軸の逆方向から見た状況である。細編み作業を大きく分けると図 2(a)、図 2(c) に示す 2 つの状態 S_1 、 S_2 と、図 2(b)、図 2(d) に示す 2 つの動作 $M_{1\rightarrow 2}$ 、 $M_{2\rightarrow 1}$ に分けることができる。ここで、 $M_{1\rightarrow 2}$ は、編み目の裏山に針を入れ、手を回転させながら針先に糸をかけて手元（矢印の方向）に引き上げる動作であり、 $M_{2\rightarrow 1}$ は、針先に糸を再度かけて、 S_2 の 2 本の輪から一度に糸を引き抜く動作である。すなわち、 $M_{1\rightarrow 2}$ と $M_{2\rightarrow 1}$ は、それぞれさらに「回転させながら針に糸をかける」動作と「糸を引く」動作の 2 つに分解でき、引き動作には「引き上げ動作」と「引き抜き動作」が存在することがわかる。

(1) 定量的評価指標の構築

基礎実験として機械編みと手編みの比較を行い、基本編みの巧拙に対する定性的な評価は、編み目のパターンの整列具合に深く関連するという指針を得た。そこで本研究では、編み目パターンにおける裏目一つ分を構造単位（ユニット）と捉え、規則性を表す特徴量と編み地全体に対する評価指標を定める。

(2) 技能要素の解析とモデル化

図 2 に編み動作の概要を示したが、整った編み目を形成するためには、一目を編むために二回行われる引き動作が重要である。この引き動作を特徴づける手先の動き、操作時の力覚情報、ならびに視覚情報を取得するために、図 3 に示す計測システムを構築した。

作業を行う領域を含む実験環境を図 3(a) に示す。作業者は机の前に座り、その作業動作を右手上方からモーションキャプチャで撮影して 3 次元計測を行う。手先の動きを計測するために、かぎ針を保持する親指と人差し指の末節骨を剛体リンクと見なして 3 点以上のマーカを固定し、その位置姿勢を計測する (図 3(b))。また、かぎ針末端の延長線上にもマーカを設置してかぎ針自体の動きの計測も行う。作業者の視線計測には Pupil Labs 社製のアイトラッカ Pupil Core を使用した。視線

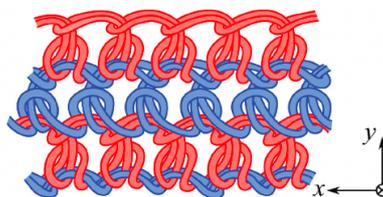


図 1 細編みの編み目構造

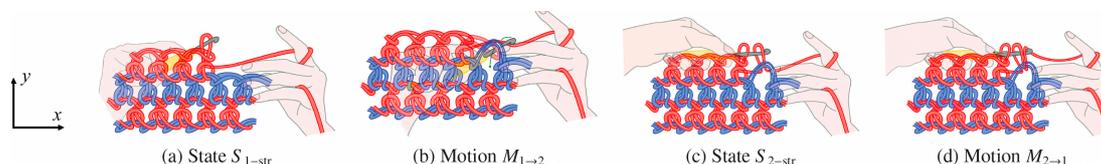


図 2 かぎ針による細編み動作（一目分）

計測装置に固定したマーカーにより頭部の位置姿勢変化を計測し、手先動作と合わせた視線移動データを取得する(図3(c)).
 なお、3次元計測にはNaturalPoint社製のOptitrack V120 Trioを、指先反力の計測にはTouchence社製の6軸力センサであるアンプー体型ショックチップ 6DoF-P50を使用した。

4. 研究成果

(1) 定量的評価指標の構築

図4に編み目の定量評価の構造単位(ユニット)となる一目分を示す. 細編みにおけるユニットはギリシャ文字の π の様な形状をしており, 本研究では, その冠状の部位の幅 l_r , 左右の脚部それぞれの長さ l_L, l_R , 左右の脚部の幅 l_B を編み目の形状を決定する特徴量として定める. この時, 各特徴量を計測するための点を $\mathbf{p}_k=(u_k, v_k)$ ($k=1, \dots, 6$)とする. また, 複数の編み目の整列の仕方が定性的な見た目の評価に関係するため, ユニット間に生じる空隙の幅である l_{gap} の大きさと, 冠状部と左右の脚の接点 \mathbf{p}_3 を代表点としてユニットの整列の規則性を表す $\delta_p = |{}^{(i+1,j)}\mathbf{p}_3 - {}^{(i,j)}\mathbf{p}_3|$ を特徴量として考慮する.

これらの値は, 作品中に存在する多数のユニットについて個々に求められるため, 各指標の統計量を求めることで作品全体の巧拙を定量評価する. 具体的には, 全ての指標に対して全ユニット平均値によって各指標が表す物理量を評価する. その中で形状の大きさや空きを表す l_r と l_{gap} に関しては, ユニット間でのばらつきが定性的な見た目に影響を与えるため, 相対的なばらつきを表す変動係数 $CV_{\ell} = \sigma_{\ell} / \bar{\ell}$ ($\bar{\ell}$: 平均値, σ_{ℓ} : 標準偏差)を定義し, この値によって評価する.

これらの評価指標の検証のため, 編み作業中に両腕の肘部を固定して編んだ場合と肘部を浮かせて編んだ場合の編み地の比較を行った. これは編み物指南書における「糸と針の把持フォームを固定する」という記述に基づいている. 肘部を固定した場合は, 各編み目に対して同様に力や回転が加わるため, 編み目パターンの均一性が高い作品ができると考えられる. 一方, 肘部を浮かせた場合は, 力の加わり方や回転量にばらつきが出るため, 編み目パターンが不均一になると考えられる.

図5(a)(b)にそれぞれの条件での作品例を示す. 黄色の点は各ユニットの特徴点の中から $\mathbf{p}_2 \sim \mathbf{p}_4$ をプロットしたものである. 肘を固定して作成されたものの方が, 全体的に目が揃った良い編み目を感じられる. 各条件の評価指標の値をみると(図5(c)), 肘を固定した場合の方が全ての値が小さくなっている. これは各ユニットの形状変化やユニット間隔の変化が小さく, 隣接ユニット間の上下ずれも少ない均一性の高い編み目になっていることを示しており, 目視での定性的な評価と定量的な評価指標の結果が合致していることが確認できる.

(2) 技能要素の解析とモデル化

編み作業中の手先の動きや指先反力, 視線データなどから, 均一性の高い巧みな細編みを実現するための技能要素の解析を行う. 肘を固定した場合に巧みな細編みを実現しやすいことから, 肘を固定した場合の結果を熟練動作, 肘を浮かせた状態で編んだ動作を修練者の動作として扱

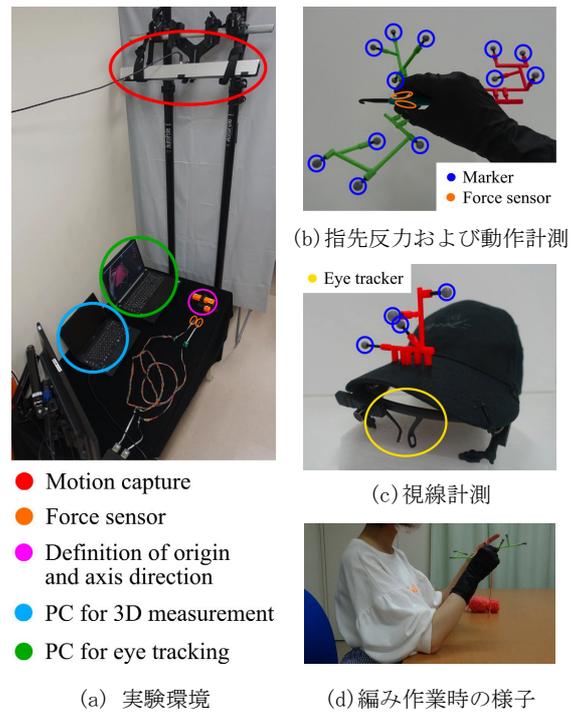


図3 動作計測システム

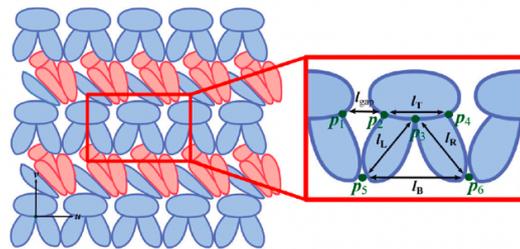
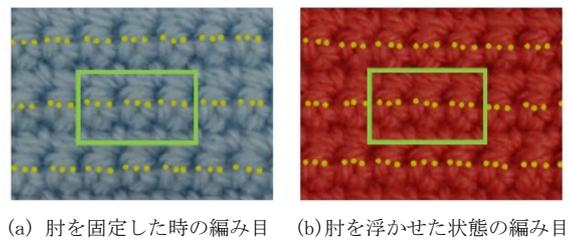


図4 評価構造単位と特徴パラメータ



	CV_{l_r} [%]	$CV_{l_{gap}}$ [%]	δ_p 平均 [mm]
(a) 肘を固定した場合	7.55	12.4	2.9
(b) 肘を浮かせた場合	9.41	14.1	4.4

(c) 編み目の定量評価結果

図5 編み動作に制約を加えた際の編み目の違いとその定量評価結果

い、両者を比較した。

(2-1) 手先動作と指先反力の相関関係

5 ユニット分の裏目を編んでいる時の親指の動きならびに指先反力の計測結果を図 6 に示す。図 6(a)は肘を固定して編んだ場合、図 6(b)は肘を浮かした状態で編んだ場合の結果であり、上段はかぎ針を操作する親指の姿勢変化、下段はかぎ針を操作する親指の指先反力の値を示している。赤色の点線はユニットの編み終わりを表し、黄色と赤色の点線で挟まれた部分は、図 2(d)における引き動作 ($M_{2 \rightarrow 1}$) を表す。図 6(a)と図 6(b)の比較から、肘を固定した場合、一目編むのに要する時間がほぼ一定であること、一目編む間にかぎ針にかかっている力が均一であること、引き動作の際の親指の姿勢変化がユニット間で一定（つまりかぎ針の回転量が均一）であることが読み取れる。一方、肘を浮かせた場合は、一目編むのに要する時間に大きなばらつきがあり、かぎ針に掛かる力や引き動作の際の回転量がユニット間で不均一である。ここから、引き動作時にかぎ針の回転量や力を均一化することが、規則正しく整列した編み目を実現するために重要であることが分かる。

(2-2) 手先動作と視線の関係性

引き動作時の糸の引き量に着目した解析を行った。一目編む間に糸を引く動作は引き上げ動作（図 2(b) $M_{1 \rightarrow 2}$ ）と引き抜き動作（図 2(d) $M_{2 \rightarrow 1}$ ）の二種類存在し、引き上げ動作 $M_{1 \rightarrow 2}$ では裏目の上部構造 (l_T) を、引き抜き動作 $M_{2 \rightarrow 1}$ では隣接するユニットとの隙間 (l_{gap}) が決定される。各値は動作時の糸の引き量に大きく依存し、引き量が大きすぎると緩んだ編み目に、少なすぎると固く閉まりすぎた編み目が生成されるため、糸の引き量を調整することは編み目を揃えるために非常に重要である。ここでは、作業者は糸の引き量を目視で調整しているという仮説を元に、引き動作時の視覚情報の役割について確認した。図 7 に 3 ユニット分の裏目を編んでいる時の、水平方向に対してのかぎ針の動きと視線の動きを示す。緑色の点線はユニットの編み終わりを表し、赤色の点線で囲まれた部分は引き上げ動作 $M_{1 \rightarrow 2}$ 、青色の点線で囲まれた部分は引き抜き動作 $M_{2 \rightarrow 1}$ を行っているところである。引き上げ動作 $M_{1 \rightarrow 2}$ と引き抜き動作 $M_{2 \rightarrow 1}$ とともに、かぎ針の動きは右肩上がりに変化しており作業者から見て右方向に移動していることが確認できる。その際、視線の動きは一旦減少してから増加しており、作業者から見て左方向に視線を移してから右方向に視線を向けていることが確認できる。このことから作業者は左手の糸の張り具合を一度目で確認してから、引き動作を行う針先に視線を移していることが確認でき、視覚情報の役割が明らかになった。

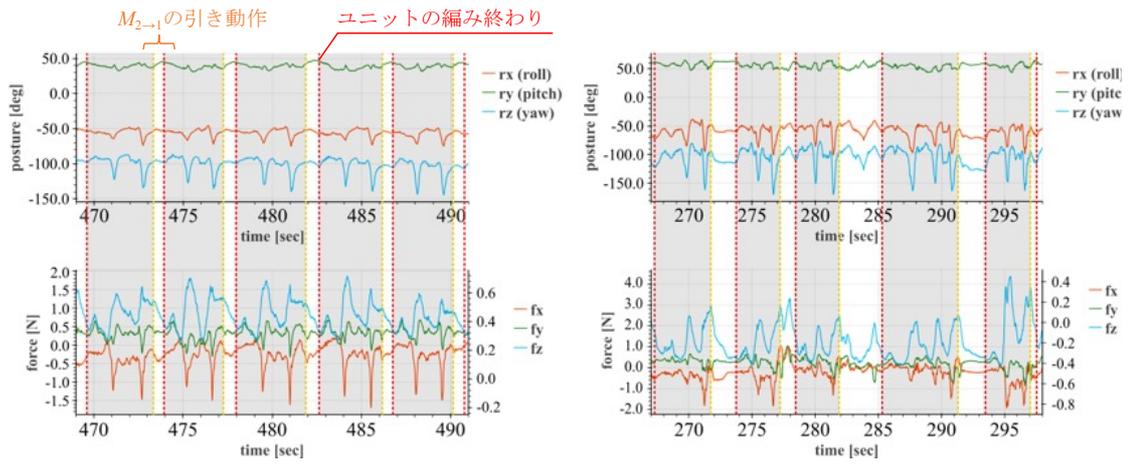
(2-3) 動作モデルの生成

ここまでで、均一性の高い巧みな細編みを実現するための技能要素を、肘を固定した場合と肘を浮かせた場合の編み動作の計測データを比較することで解析したが、これらの技能要素を伝承可能な形で残すためには、熟練動作をモデル化し、修練者が習得するために自身の作業データと比較可能にすることが求められる。そこで本研究では、機械学習を用いて動作識別器を生成することで、時系列データを自動的に単位動作に分割可能な編み動作モデルを構築する。

まず動作識別を行うために、引き動作を更に細かい単位動作に分割した。引き上げ動作 $M_{1 \rightarrow 2}$ については、裏山に針を入れる動作 M_{stick} 、針を回転させる動作 M_{roll} 、針を回転させて糸をかける動作 M_{hook} 、糸を引く動作 M_{pull} 、針を持ち上げる動作 M_{raise} の 5 つの単位動作に、引き抜き動作 $M_{2 \rightarrow 1}$ については、針を回転させる動作 M_{roll} 、針を回転させて糸をかける動作 M_{hook} 、糸を引く動作 M_{pull} の 3 つの単位動作に分解した。 M_{roll} 、 M_{hook} 、 M_{pull} は両動作に共通するもので、計 6 種類の単位動作から編み動作は形成されることがわかる。各状態と分解した単位動作による遷移を図 8 に示す。

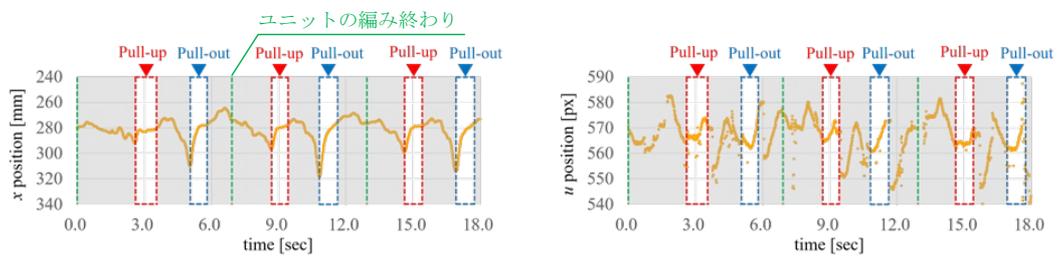
編み動作の場合、単位動作の時間幅にばらつきがあり、比較的長めの時系列データを処理する必要があることから、再起型ニューラルネットワークの一つである Long Short Term Memory (LSTM) を用いることとした。まず熟練動作として肘を固定した編み動作データを単位動作に分割したデータセットを構築し、LSTM への入力の手先の動きに関する並進・回転の 6 次元、最終層の全結合層の出力は 6 種類の単位動作に対する確率分布とし、時系列データを学習した。なお、修練者の動きを模擬する肘を浮かせた編み動作については、少数の作業データを用いて最終層の重みのみを学習する転移学習を行うことで別の動作モデルを取得した。

新たな作業データに対して、固定肘および自由肘の各学習済み動作モデルを用いて動作識別を行った結果を図 9 と図 10 に示す。紫色の網掛け部は裏山に針を入れる単位動作 M_{stick} と識別された部分、黄色は針を回転させる M_{roll} 、緑色は針を回転させて糸をかける M_{hook} 、桃色は糸を引く M_{pull} 、水色は針を持ち上げる M_{raise} 、黒色は次の編み目への遷移動作 $M_{transit}$ と識別された部分である。図 8 の基本状態遷移と比較すると、単位動作の識別結果はほぼ正確であることが確認できる。一部、図 9 の 10s 付近や図 10 の 5s 付近において M_{raise} と $M_{transit}$ が混在して交互に現れているが、次の編み目を形成するための単位動作 $M_{transit}$ 時にかぎ針を上方に持ち上げたことで M_{raise} と誤識別されたのだと考えられる。このように、熟練動作で構築した動作モデルを用いて、少量データによる転移学習により修練者の動作モデルを生成でき、訓練動作を各単位動作に自動分割できることを確認した。これにより、熟練者の編み動作と修練者自身の編み動作の比較を単位動作ごとに行うことが容易になり、(2-1)や(2-2)で示した技能要素について習熟度の確認



(a) 肘を固定して編んだ場合（固定肘，親指） (b) 肘を浮かせて編んだ場合（自由肘，親指）

図6 手先動作と指先反力の計測結果（5ユニット分）



(a) かぎ針の水平方向への動き (b) 視線の水平方向への動き

図7 かぎ針の動きと視線の関係性（3ユニット分）

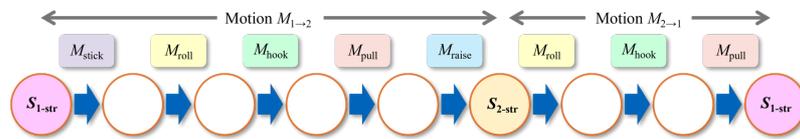
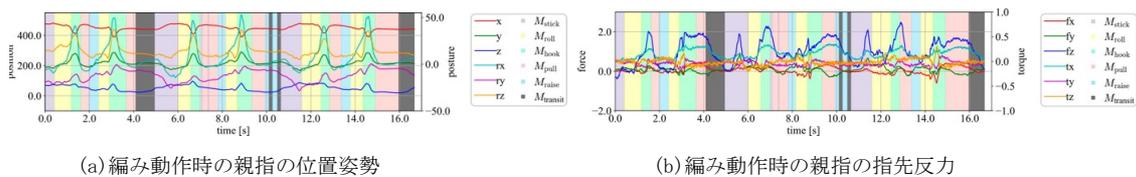
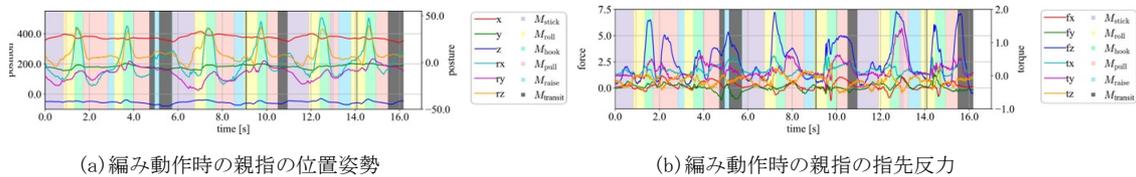


図8 引き動作の単位動作への分割と状態遷移



(a) 編み動作時の親指の位置姿勢 (b) 編み動作時の親指の指先反力

図9 肘を固定した編み動作の単位動作への自動分割結果（3ユニット分）



(a) 編み動作時の親指の位置姿勢 (b) 編み動作時の親指の指先反力

図10 肘を浮かせた編み動作の単位動作への自動分割結果（3ユニット分）

やその後の訓練の方向性を定めることができるようになる。

<引用文献>

[1] 森俊夫：“画像解析による編目模様の特徴的評価,” 日本衣服学会, Vol. 53, No. 2, pp. 98-106 (2010)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木村優希, 戸田沙也香, 藤井浩光
2. 発表標題 編み物における巧拙評価のための編み目模様と手先動作の解析
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高澤 怜里, 藤井 浩光
2. 発表標題 編み物技能の巧拙評価のための編み目形状に関する手先動作と指先反力の解析
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高澤 怜里, 藤井 浩光, 山野辺 夏樹
2. 発表標題 編み物における技能理解のための編み目形状生成に関わる引き動作中の視線解析システム
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高澤 怜里, 藤井 浩光, 山野辺 夏樹
2. 発表標題 編み物の技能理解に向けた手先の動きを用いた動作モデル生成による技能解析
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2023)
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	藤井 浩光 (Fujii Hiromitsu) (30781215)	千葉工業大学・先進工学部・准教授 (32503)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------