

E-String Figures: 導電繊維編み込み紐を用いた あやとり技認識システム

永山 晃誠 崔 明根 武山 侑輝 赤田 真由 高田 峻介
志築 文太郎

導電繊維を編み込んだ紐および両手の指に取り付けた電極を用いた、あやとり技を認識するシステムを示す。本システムでは、両手の 10 本の指に装着した電極を用いて各電極間を流れる電流を測定し、得られた測定値から機械学習を用いてあやとり技を認識する。あやとりは技によって紐の絡まり方および紐同士の接触点が異なるため、技ごとに電極間を流れる電流の経路が異なると考えられる。実験にて、3 種類の連続技と呼ばれるあやとり技のそれぞれの変形工程を認識したところ、連続技 1 の F 値が 0.91、連続技 2 の F 値が 0.98 および連続技 3 の F 値が 0.82 という精度で認識できた。また、3 種類の連続技の変形工程を全て合わせた 36 工程を認識したところ、F 値が 0.87 という精度で認識できた。

We present *E-String Figures*, a system for recognizing string figures using conductive fibers braided into a string and electrodes attached to the fingers of both hands. The system measures potential differences between electrodes on all ten fingers and applies machine learning to identify string figures based on these measurements. Since the way the cord is intertwined and the contact points vary for each figure, we assume that the resulting current paths between the electrodes also differ accordingly. To evaluate this hypothesis, we investigated whether the proposed system could estimate the transformation stages of three different string figure series. Consequently, we achieved F-scores of 0.91 for Series 1, 0.98 for Series 2, and 0.82 for Series 3. Furthermore, when evaluating all 36 transformation stages combined across the three series, we obtained an overall F-score of 0.87.

1 はじめに

あやとりは、1 本の輪にした紐を手につけ、指を用いてその紐を操作することによって様々な形象を作り出す伝承遊びである [1][16]。日本では平安時代から存在していたと考えられており、主に子供遊びとして古くから親しまれてきた [11]。また、あやとりは海

外でも親しまれており、アフリカ、アジア、北アメリカ、南アメリカ、オセアニアおよび極北圏などの地域において、その文化および風土を反映した多様なあやとり技が伝承されている [6]。

あやとりを遊ぶことによる、教育的効果もいくつか報告されている。あやとりは複雑な手指運動を伴うことに加えて、あらかじめ記憶した手順を思い出しながら紐を操作する必要があるという特徴を持つ遊びであるため、あやとり遊びによる脳の活性化効果が認められている [15][17][18]。さらに、あやとりを遊ぶことによって幼児の指先の操作能力および数学的能力が養われる可能性があるとの報告もされている [11][20]。そのため、文化の継承および幼児の発達を目的として、全国の多くの幼稚園・保育園にてあやとりが実施されている [1]。

あやとりでは、あらかじめ決まった手順に従って紐

E-String Figures: the Recognition System of String Figures with Conductive Fibers Braided into a String.

Kosei Nagayama, Myunguen Choi, Yuki Takeyama, Mayu Akata, Buntarou Shizuki, 筑波大学, University of Tsukuba.

Ryosuke Takada, 神戸市立工業高等専門学校電子工学科, Department of Electronics, Kobe City College of Technology.

コンピュータソフトウェア, Vol.43, No.1 (2026), pp.2–14.

[研究論文] 2025 年 2 月 28 日受付.



図 1 導電繊維編み込み紐.



図 2 銅テープ貼付手袋.

を操作することによって特定の形状(あやとり技)を実現する. 紐を操作する手順(変形工程)はあやとり技ごとに数手から数十手にまでおよぶため, あやとり技ごとの操作手順の習得には時間がかかる. 1人であやとりを習得するための教材として, 主に書籍および動画が挙げられるが, あやとりを操作している最中は両手が塞がっているため, あやとりを操作しながら途中で書籍のページをめくったり, 動画を再生/停止することが難しい [11]. そのため, あやとり技の変形工程を認識することによって, 自動で次の紐の操作を指示するシステムが求められる.

本研究において我々は, 導電繊維を編み込んだ紐を用いたあやとり技認識システムである E-String Figures を開発した. 本システムは, 図 1 に示す導電繊維を編み込んだあやとり紐(導電繊維編み込み紐), 図 2 に示す 10 本の指先の内側から甲部分にかけて銅テープを貼付した手袋(銅テープ貼付手袋), および測定値からあやとり技を認識するための機械学習モデルから構成される. 本システムでは, まず手袋に貼付された銅テープを電極として, 指に掛かっている導電繊維編み込み紐に電流を流す. この状態において,

電極間を流れる電流を測定する. 図 3 に示すように, あやとりは技によって紐の絡まり方が異なるため, 電流は技によって異なる経路で紐内を流れる. したがって, 電極間を流れる電流は, 技によって変化すると考えられる. 本システムでは, この技ごとの電流の違いを機械学習モデルを用いて分類することによって, あやとり技を認識する.

実験では, 3 種類のあやとり連続技の各変形工程における測定値を記録し, 連続技ごとにその変形工程を認識するモデルを構築した後に, これらの認識精度を調査した. さらに, 3 つの連続技の変形工程全てを同時に学習したモデルを構築し, これの認識精度を調査した. 実験の結果, いずれのモデルにおいても高い認識精度であやとり技の変形工程を認識できることが明らかになった. また, 本システムによって得られる測定値には個人差が少なかったため, 他人のデータを用いることによって容易に認識可能な技を増やせることがわかった.

なお, 本論文の内容は [13] に, 関連研究, 本論文におけるあやとりの変形工程の定義の詳細, および 3 つの連続技の変形工程を同時に学習したモデルによる認識精度に関する議論を加えたものである.

2 関連研究

本システムでは, 導電繊維編み込み紐の絡まり方による紐中の電流経路の変化, それに伴う紐中の電流の変化の両方を, 両手の 10 本の指に装着した電極を用いて測定することによってあやとり技を認識する. 本節では紐状インタフェース, あやとり技の認識手法, および多電極間の電位差測定に基づくセンシング手法に関する関連研究を述べる.

2.1 紐状インタフェース

各種センサを搭載した紐, あるいは特殊な内部構造を持った紐へのジェスチャ(タッチ, ねじる, 結ぶなど)を認識し, それをコンピュータへの入力に活用するインタフェースが研究されている. 既存の紐にセンサ(圧力センサ, 抵抗式ポジションセンサ, 曲げセンサ, 光学式センサ)を搭載することによりジェスチャを認識するもの [2] [9] [14] [27] [28] [31], スリットが入っ



図3 導電性あやとり紐の技(絡まり方)ごとの紐同士の接触点および紐中の電流経路(一部)

た光ファイバを内蔵したもの [3][4][33], チューブ内に複数個のコイルを内蔵し, コイル同士の相互誘導による起電力からチューブの変形を認識するもの [35], ならびにコイル状になった銅線および導電繊維をシリコンを用いて挟んで多重に配置し, コイルの変形によってジェスチャ認識するもの [30] などが提案されている。

また, 導電繊維を編み込んだ紐を用いた紐状インタフェースも開発されている。導電繊維を編み込んだ紐を人体, または導電性を持たせた毛糸, クリップおよびフックなどのアイテムを経由して接地することによって紐へのタッチ位置を検出するもの [26][27], 皮膚付き導電繊維を編み込んだ組紐の静電容量の変化を用いてジェスチャ認識するもの [21][22][27] などが提案されている。さらに, 穂積ら [5] は, 導電繊維を編み込んだ紐を引っ張った状態および結んだ状態の電気的特性を評価することによって, この紐をタンジブルインタフェースとして活用するための検討を行っている。

これらの研究と比較して我々の研究は, 導電繊維を編み込んだ紐の絡まり方による紐中の電流経路の変化, それに伴う紐中の電流の変化を用いてあやとり技を認識する点において異なる。

2.2 多電極間の電位差測定に基づくセンシング手法

多電極間の電位差測定によって, ジェスチャの認識, ならびに物体へのタッチおよびその位置を推定するセンシング手法が研究されている。電気インピーダンストモグラフィ (Electrical Impedance Tomography:

EIT) は, 測定対象の表面に配置した多数の電極間の電位差を測定し, 電極間を流れる電流を算出することによって, 対象内部あるいは表面の導電率の分布を推定し, 画像化する技術である [7][32]。この技術は, 人体や導電布に適用することによって, 身体を用いたジェスチャおよび導電布へのジェスチャを認識する手法に应用されている [38][39][41][42]。さらに, 導電性物体に触れた際に電流の一部が人体を経由して接地される現象を活用し, EIT の原理を応用して物体へのタッチ位置を推定する手法も提案されている [29][40]。

一方で, EIT とは異なるアプローチとして, 多電極間の電位差測定に基づくタッチ位置推定の例に, 導電繊維を用いた触覚センサがある [24]。このセンサは, 中間層であるピエゾ抵抗膜が, 信号線である導電繊維がそれぞれ縦方向, あるいは横方向に複数本編み込まれた布によって挟み込まれた構造を有する。ピエゾ抵抗膜がタッチによって変形すると, その部分の抵抗値が変化する。この抵抗値変化を, 縦横の導電繊維を用いて測定することによって, タッチ位置を検出する。この手法は, 靴下 [10], 衣服の袖 [23], カーペット [34], アームカバー [25], およびなどに应用されている。

我々の提案システムでは, これらのセンシング手法と同様に, 各指に装着した電極間の電位差を測定することによって, 導電繊維が編み込まれた紐の形状を認識する。我々は先行研究として提案システムのプロトタイプングを行い, あやとり技ごとに紐中を流れる電流が異なることを確認している [12]。したがって, この電流の違いを検出することによって, あやとり技

を認識できると考えた。

2.3 あやとり技の認識手法

あやとり技を認識する手法として、カメラを用いる手法 [19]、および導電繊維を用いる手法 [8] が提案されている。One-String [19] はスマートフォンのフロントカメラを用いて「びっくりほうき」の制作までの4工程における紐形状を認識している。ユーザがあやとりをしている様子を撮影した映像を用いて認識を行うため、特殊な構造をした紐やセンサを必要としないが、環境光およびユーザの服の柄の影響を受ける。この影響を除くために映像からあやとり紐の部分をトリミングしているが、その精度は約6割と報告されている。加えて、カメラにあやとり紐が写り続けるようにするためにユーザは常にカメラの前に滞在する必要があり、かつあやとり紐がカメラに対してオクルージョンを起こさないように、あやとり紐の位置を適切に配置する必要がある。

String Figuring [8] は、我々のシステムと同様に、あやとり紐同士が絡んだ接触点において導電繊維同士が短絡することにより、紐の抵抗値が変化する現象を用いて紐形状を推定している。この手法では、毛糸および導電繊維を共にリリアン編みすることによって作製した中空構造のチューブに、芯材として表面に絶縁加工が施された針金を通した紐が用いられている。加えてチューブおよび芯材の間に、回路を接続するための信号線、および5つの銅箔電極が配置されている。この手法ではチューブの抵抗値変化から紐同士の接触点および曲げなどの紐形状を推定できる。しかし、紐の中心に針金を通してあるため紐が固く、かつ紐の端から電圧測定用の信号線が伸びているため、紐を複雑に絡ませることができない。

これらの手法と比較して提案システムは、導電繊維編み込み紐を用いるため、環境光およびオクルージョンの問題を受けない。また、指に装着した電極を用いてあやとり紐中を流れる電流を測定するため、紐が柔軟であり、複雑な技を作ることでもある。

3 E-String Figures

本研究では、導電繊維編み込み紐を用いたあやとり技認識システムである E-String Figures を提案する。以下に、本システムの原理およびシステム構成を示す。

3.1 原理

あやとりを行うと図3に示されるように紐同士が様々な位置で絡まる。その絡まり方(紐の接触点、1か所で絡まる本数など)はあやとり技ごとに異なる。また各指が触れる紐上の位置もあやとり技ごとに異なる。

我々は導電繊維を編み込んだ紐および各指に取り付けた電極を用いることによってあやとり技を認識することが出来ると考えた。あやとり技が異なれば、あやとり技ごとに異なる短絡が生じ、また、各指が触れる紐上の位置も異なる。このため、技ごとに電極間の電流経路も異なる。この違いは、ある指の電極に電圧を印加すると、他の指の電極に流入する電流の大きさの違いとなって現れる。本システムは両手の10本の指に設けた電極間を流れる電流を測定し、得られた測定値から機械学習によってあやとり技を認識する。

3.2 システム構成

あやとり技を認識するためのシステムの構成を述べる。本システムは、紐に流れる電流を測定するハードウェア、および測定値からあやとり技を認識するためのソフトウェアから構成される。

3.2.1 紐電流測定ハードウェア

紐に流れる電流を測定するハードウェア構成を以下に述べる。

導電繊維編み込み紐

作製した導電繊維編み込み紐を図1に示す。我々はこの紐を、3本の導電繊維(フジックス, Smart-X)および非導電性の刺繍糸を束ねたものをアイコードニッター(AZ-Front, YL-508)を用いてリリアン編み[8][37]することによって作製した。紐の電気抵抗値は $40.0\ \Omega/\text{m}$ となった。

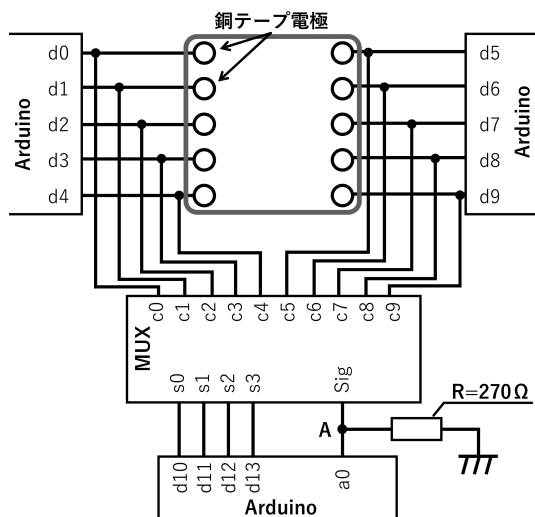


図4 電流測定回路。図中では1つのArduino Megaを3つに分割（左上部，右上部，下部）して表記している

銅テープ貼付手袋および測定回路

銅テープ貼付手袋を図2に、電極間を流れる電流を測定するための回路を図4にそれぞれ示す。本システムでは、絶縁性のビニール手袋(DAISHO)の指部分に貼布した銅テープを電極として用いることによって、指に触れた導電繊維編み込み紐を電流測定回路に接続できるようにした。銅テープはそれぞれ手袋の両手の10本の指先の内側から甲部分にかけて貼り付けられており、手袋の手の平側を通して貼り付けた信号線に接続されている。銅テープが指先の内側から甲まで指を覆っているため、指先の内側が紐に触れた場合においても、紐の電流を測定できる。

図4に示す電流測定回路は、測定端子の切り替えのためのマルチプレクサ(SparkFun, BOB-09056)、電圧印加および電流測定のためのマイコン(Arduino Mega)、ならびに分圧抵抗から構成される。銅テープと接続された10本の信号線は、それぞれマイコンのデジタルピン(d0-d9)およびマルチプレクサの入力端子(c0-c9)に並列に接続されている。マルチプレクサのSigピンは270Ωの分圧抵抗を介してGNDに接続されており、かつマイコンのアナログピン(a0)に接続されている。

マイコンにて動作するプログラムでは、まず10個

の電極に順番にデジタルピンから電源として5Vの電圧を印加する。ある1個の電極に電圧を印加している間に、残りの9個の電極をマルチプレクサを用いて順にGNDと接続し、アナログピンを用いて分圧抵抗にかかる電圧を読み取る。この電圧値から紐を流れた電流値を算出したものを測定値として記録する。したがって、10(通りの印加電極)×9(通りの測定用電極)=90個の測定値が得られる。この90個の測定値は、シリアル通信を用いてPCに100Hzの頻度にて送信される。

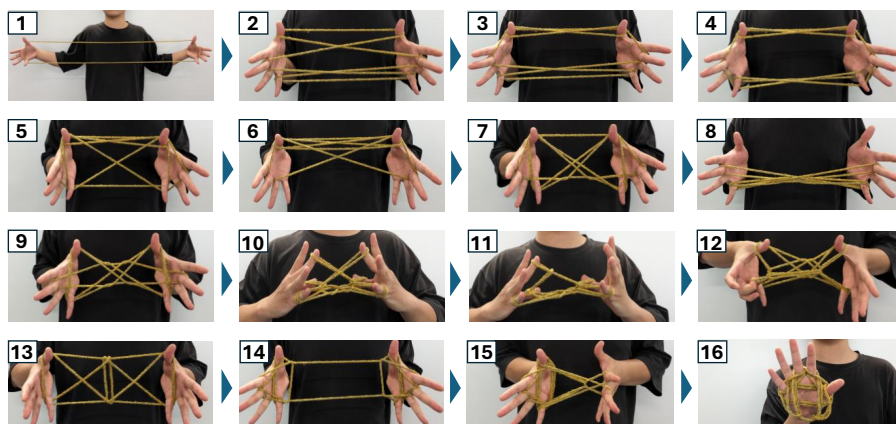
3.2.2 ソフトウェア

あやとり技を認識するために、PC上にて動作するソフトウェアを実装した。本ソフトウェアは認識にRandomForest分類器を用いる。あやとり技を作り上げる過程にて生じる紐への操作(取る, 外す, 入れ替えるおよび掛け替えるなど)を1回終えた後の状態を1工程とし、各工程における紐形状を認識する。各工程の紐形状ごとに90個の測定値を取得し、これを説明変数、各枝の何工程目であるかを目的変数としてあやとり技認識モデルを構築する。したがって、現在の紐形状における90個の測定値を技認識モデルに入力することで、リアルタイムに現在の紐形状がどの変形工程に該当するか推定できる。なお、90個の測定値は50Hzの頻度にてPCに送信されるため、本システムは1/50sごとに変形工程を推定できる。

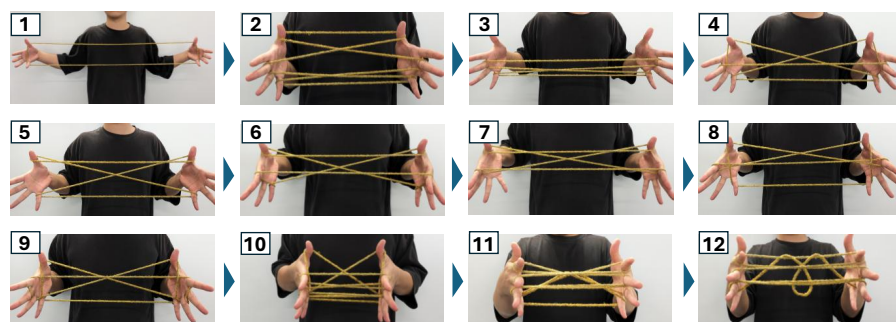
4 検証

本システムによるあやとり技の変形工程の認識精度を調査するために、変形工程ごとの測定値を収集する実験を行った。実験では、図5に示す3種類の連続技ごとの、それぞれの変形工程における紐の電流値を測定した。連続技とは、一連の紐の操作過程において、複数のあやとり技を作ることができる技を指す。通常のはあやとりは十数工程の操作を経て1つの技を作るが、連続技は少ない工程でその紐形状を大きく変えながら複数の技を作ることができる。ゆえに、少ない操作回数にて様々なあやとり技の制作および測定値の計測が可能であると考え、連続技を実験にて実施する技として採用した。

技1（くり、すべり台、かめ、かみしばい、ゴム、飛行機、かぶと）



技2（ふじさん、つき）



技3（4段はしご、東京タワー）

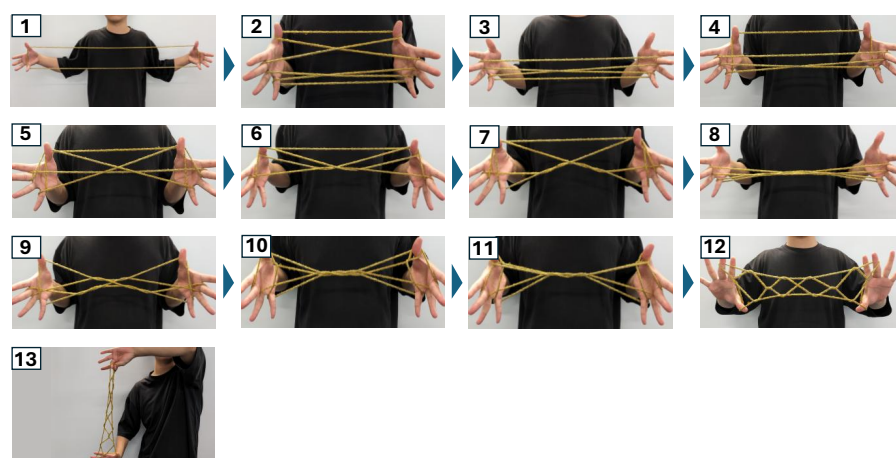


図 5 各連続技の変形工程

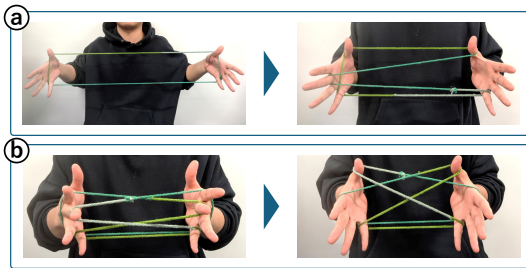


図 6 「取る」動作の例。(a) 山田らの定義した「取る」動作の例。左手の親指および小指に掛かっている紐を、右手の中指を用いて下から取っている。(b) 新たに追加した「取る」動作の例。両手の中指に掛かっている紐を、それぞれの親指を用いて下から取った後に、元々掛かっていた紐をそれぞれの中指から外している。

連続技 1 において、10 工程目が「くり」、11 工程目が「すべり台」、12 工程目が「かめ」、13 工程目が「かみしばい」、14 工程目が「ゴム」、15 工程目が「飛行機」、16 工程目が「かぶと」に該当する。次に、連続技 2 において、11 工程目が「ふじさん」、12 工程目が「つき」に該当する。最後に、連続技 3 において、12 工程目が「4 段はしご」、13 工程目が「東京タワー」に該当する。

4.1 あやとり変形工程の定義

山田ら [36] は、あやとりの基本動作は、「取る」、「外す」および「入れ替える」から構成され、あやとりの複雑な図形はこの基本動作の組み合わせから表現できると述べている。「取る」は指を用いて紐を取る動作、「外す」は指にかかっている紐を外す動作、および「入れ替える」動作は同一の指にかかっている 2 本の紐の上下を入れ替える動作であるとそれぞれ述べている。

山田らの定義した基本動作は、あやとりの複雑な動作を構成する最小要素であり、すべて片手の指 1 本を用いて紐 1 本に対して行う動作を表す。したがって、この基本動作を元にしてあやとりの変形工程を定義すると、工程数が膨大になるほか、ユーザが認識する 1 工程と印象が異なる。そこで本研究では、上記の 3 種類の基本動作の定義を一部変更した。まず、ある指に掛かっている紐を別の指に掛け替える動作である

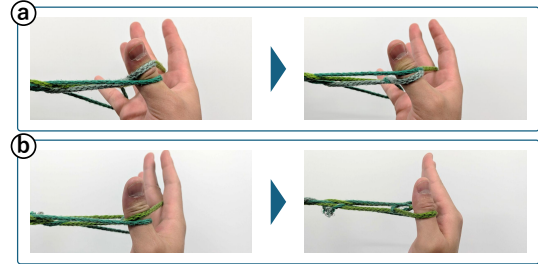


図 7 「入れ替える」動作の例。(a) 山田らの定義した「入れ替える」動作の例。右手親指に掛かった 2 本の紐の上下が入れ替わっている。(b) 本研究にて定義した「入れ替える」動作の例。右手親指に掛かった 2 本の紐の上下を入れ替えた後に、上側の紐を親指から外している。

が、これは山田らの定義によるとある指に掛かっている紐を別の指を用いて「取る」動作、およびその紐を元の指から「外す」動作の 2 動作に分割される。本研究では「取る」動作の後に続けて、同一の紐に対して同一の指を用いて「外す」動作を行った場合 (図 6b)、これらの動作をまとめて「取る」動作に含めた (図 5 に示す連続技 1 の 10 工程目および 16 工程目などが該当)。次に、「入れ替える」動作 (図 7) は同一の指にかかっている 2 本の紐の上下を入れ替える動作であり、この動作を完了した後の紐形状は完了する前のものと比べて大きく変化せず、測定値も変化しない。ゆえに本研究では、同一の指に掛かっている 2 本の紐の上下を入れ替えた後に続けて、上側の紐に対してその指から「外す」動作を行った場合、これらの動作をまとめて「入れ替える」動作とした。なお、本研究で使用した 3 種類の連続技における「入れ替える」動作は全てのこの動作である。

また、同一の指に掛かった複数本の紐に対して 3 つの動作の内のいずれかを行った場合 (図 5 に示す連続技 1 の 6 工程目、7 工程目および 8 工程目など)、山田らの定義によると紐の本数分同じ動作を繰り返したとして扱われるため、変形工程数が膨大になる。したがって、この場合は複数本の紐に対して 3 つの動作のうちのいずれかを 1 回のみ行ったものとして扱った。同様の理由により、左右で対称の位置関係にある紐同士に、順番に左右の指を用いて 3 つの動作のいずれかを行った場合 (図 5 に示す連続技 1 の 2 工程目、3

工程目および4工程目など)においても3つの動作のうちのいずれかを1回のみ行ったものとした。

再定義した3つの動作をもとに、実験にて実施する連続技の変形工程を定義する。これらのうち、いずれかの動作を終えた後、紐の弛みを無くした状態を1工程と定義する。ただし、図5に示した連続技1の14工程目から15工程目では、右手の親指を用いて左手の親指に掛かっている紐を取る動作、および右手の小指を用いて左手の小指に掛かっている紐を取る動作をまとめて1工程として扱った。これは、親指または小指のどちらかのみを用いて動作を完了した後、紐を張るのが困難であったためである。また、連続技1の15工程目から16工程目、および連続技3の11工程目から12工程目も同様の理由によって両手の4本の指の動作を1工程としてまとめている。さらに、連続技2の12工程目、「つき」は紐をあえてたるませることによって、紐図形中心に小さな輪を浮かべるあやとり技である。「つき」のみ、この紐がたるんだ状態を1工程とした。

4.2 実験手順

研究室内外の9名(男性8名、女性1名、平均年齢=23.0歳, SD=0.93, ID: P1-P9)を協力者とした実験を行った。実験協力者はまず銅テープ貼付手袋および導電繊維編み込み紐を装着し、実験者の指示を受けながら紐を操作した。実験協力者は連続技1から測定を開始した。実験協力者は変形工程が完成すると3秒間「紐をびんと張った状態」を保持した。実験者はこの3秒間の測定値50データを記録した。記録後、実験協力者は次の変形工程を制作し、同様の手順を行った。全ての工程を終えた際、実験協力者は紐を指から外した。

上記の手順を1セッションとし、1つの連続技に対して5セッション続けて測定した。これを3つの連続技に対して連続技1, 2, 3の順で行った。それぞれの変形工程数は連続技1が16工程、連続技2が12工程、連続技3が13工程であるため、1人当たり41(16+12+13)工程×50回×5セッション=10,250個のデータが収集された。

得られたデータから、個人ごとに、かつ連続技ご

表1 個人-技別モデルおよび個人-全技モデルに対して LOSO 交差検証を行った結果の F 値

	連続技 1	連続技 2	連続技 3	全技
P ₁	0.94	0.98	0.90	0.89
P ₂	0.96	1.00	0.87	0.92
P ₃	0.95	1.00	0.89	0.93
P ₄	0.73	1.00	0.75	0.84
P ₅	0.92	1.00	0.81	0.93
P ₆	0.65	0.94	0.79	0.81
P ₇	0.87	0.98	0.84	0.83
P ₈	0.92	1.00	0.79	0.91
P ₉	0.92	0.99	0.78	0.88
P _{ave}	0.87	0.99	0.82	0.88

とに構築したモデル(以下、個人-技別モデル)、個人ごとに、3つの連続技のデータをまとめて構築したモデル(以下、個人-全技モデル)、全実験協力者のデータを技別にまとめて構築したモデル(以下、全協力者-技別モデル)、および全実験協力者のデータをまとめて、かつ3つの連続技のデータをまとめて構築したモデル(以下、全協力者-全技モデル)の合計4種類のモデルを構築し、これらのモデルによる認識精度を調査した。モデルごとの認識精度は交差検証によって算出し、個人-技別モデルおよび個人-全技モデルでは Leave-One-Session-Out 交差検証(以下、LOSO 交差検証)を、全協力者-技別モデルおよび全協力者-全技モデルでは Leave-One-Participant-Out 交差検証(以下、LOPO 交差検証)を実施した。

4.3 実験結果

表1に、個人-技別モデルおよび個人-全技モデルの認識精度を示す。LOSO 交差検証の結果、個人-技別モデルの F 値の平均はそれぞれ連続技1が0.87、連続技2が0.99、連続技3が0.82、個人-全技モデルの F 値の平均は0.88となった。

図8および図9に、全協力者-技別モデルおよび全協力者-全技モデルに対して LOPO 交差検証を行った結果の混同行列をそれぞれ示す。LOPO 交差検証の結果、全協力者-技別モデルの F 値はそれぞれ連続技1が0.91、連続技2が0.98、連続技3が0.82、全協

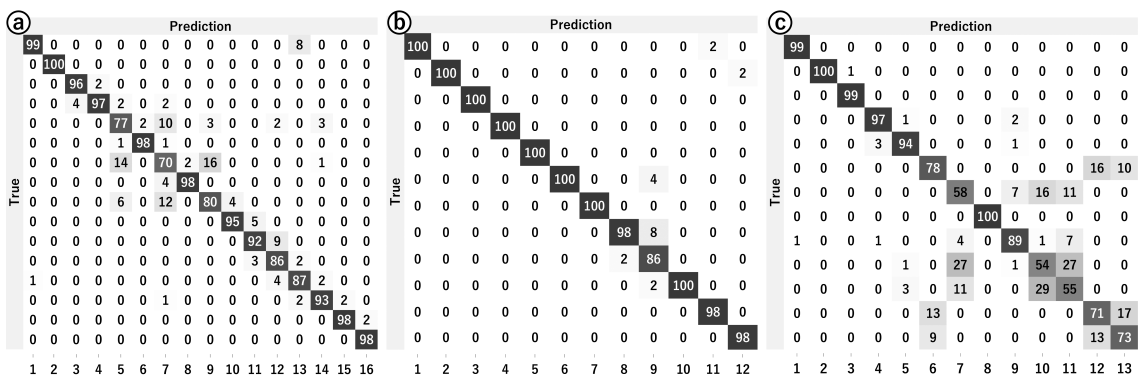


図 8 全協力者-技別モデルに対して LOPO 交差検証を行った結果の混同行列. (a) 連続技 1. (b) 連続技 2. (c) 連続技 3.

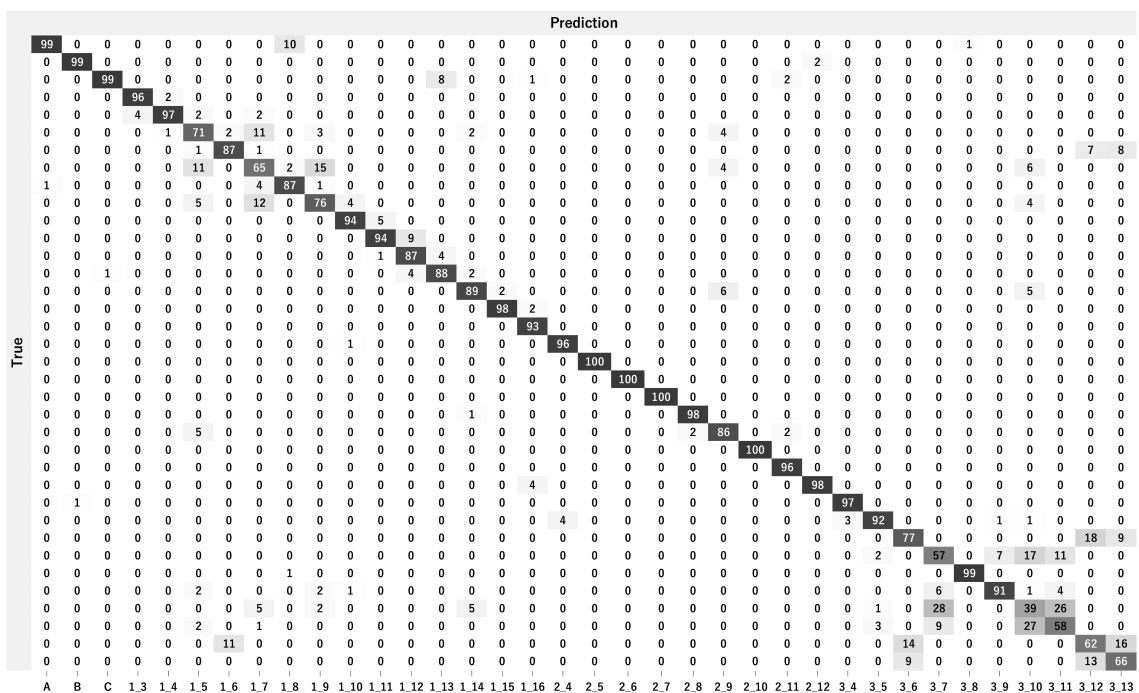


図 9 全協力者-全技モデルに対して LOPO 交差検証を行った結果の混同行列

力者-全技モデルの F 値は 0.87 となった。

なお、図 9 の混同行列において、連続技 1 の 1 工程目、連続技 2 の 1 工程目および連続技 3 の 1 工程目、ならびに連続技 1 の 2 工程目、連続技 2 の 2 工程目および連続技 3 の 2 工程目はそれぞれ同じ紐形状であるため、それぞれまとめて A 形状および B 形状としている。同様に、連続技 2 の 3 工程目および連続技 3 の 3 工程目も同じ形状であるため、これら

をまとめて C 形状としている。したがって、3 つの連続技の全変形工程を認識する場合、その工程数は 36 となる。

4.4 考察

結果から、本システムは全ての連続技の変形工程を 8 割以上の精度で認識できることがわかった。したがって本システムは、導電繊維編み込み紐の絡まり

方の変化による紐中の電流経路の変化, それに伴う紐中の電流の変化を用いることによって, あやとり技の変形工程を高精度に認識することが可能であると言える。

LOSO 交差検証だけではなく, LOPO 交差検証によっても高い F 値を得られたため, 本システムによって得られる測定値間には個人差による影響が少ないと考えられる。したがって, 本システムを用いたあやとり習得支援システムは, ユーザごとに分類器のキャリブレーションを行う必要がないと考えられる。

また, LOSO 交差検証および LOPO 交差検証のいずれにおいても連続技 3 の認識精度が低くなった原因として, 形状は異なるが, 得られる測定値が似ている紐形状が, 他 2 つの連続技に比べて多く含まれていることが挙げられる。図 8c の混同行列を見ると, 連続技 3 の 10 工程目を, 7 工程目および 11 工程目の形状と誤認識した回数が多いことがわかる。図 5 に示した変形工程を見ると, いずれの工程も, 両手の親指, 中指および小指に紐をかける形状であるという点において共通していることがわかる。そのため, この 6 本の指の電極が紐を通して接続され, かつ得られた測定値も類似したと予想される。ただし, 連続技 3 の 7 工程目および 10 工程目は, 連続した変形工程ではない。あやとりはあらかじめ決まった手順を順番に実行して技を作る遊びであるため, 直前の工程を正しく認識することができれば, その工程を基に次の変形工程を推測することによって, 紐形状の認識精度を向上できると考えられる。したがって, 本システムにおける, 連続していない工程間にて生じる誤認識の影響は小さいと考えられる。

全協力者-技別モデル, および全協力者-全技モデルを比較すると, 全協力者-技別モデルにおける連続技 1 および連続技 2 の F 値がそれぞれ 0.91 および 0.98 に対して, 全協力者-全技モデルの F 値が 0.87 と, 連続技別にモデルを用意した場合の方が認識精度が高くなっていることがわかる。一方で, 図 9 の混同行列を見ると, 異なる連続技同士の変形工程間での誤認識の回数は少なく, 連続技 3 の 10 工程目および 11 工程目間での誤認識など, 同一の連続技の変形工程間での誤認識が多く生じていることがわかる。このこと

から, 本システムでは 36 工程ほどの変形工程を分類する場合, 複数のあやとり技の変形工程を単一のモデルを用いて認識した場合においても, 異なる技同士の変形工程間では誤認識が生じない可能性があると考えられる。

5 今後の課題

新たな技の追加学習

本論文では, 提案システムによる 3 種類のあやとり連続技の変形工程のみを認識したが, それ以外の多くのあやとり技を認識するためには, それぞれの各変形工程における測定値を取得し, 既存のモデルを追加学習させる必要がある。そのため, あらゆるあやとり技を認識するためには大量のデータを収集する必要がある。なお, 実験の結果, 本システムによって得られる測定値には個人差がなく, 他人のデータを用いて構築した分類器においても高い精度であやとり技を認識できることがわかった。したがって, 本システムでは認識可能なあやとり技の数を容易に増やせる可能性がある。

誤った手順の指摘

本システムは, あやとりの初心者にあやとり習得を支援するためのアプリケーションへの応用を想定している。初心者はあやとりに習熟した者とは異なり, あやとりを習得する過程において, あやとり紐の取り方を間違える可能性がある。しかし, 本システムでは, あやとり技の正しい変形工程のみを認識したために, 各変形工程にて生じた紐の誤操作を検出できない。したがって, 本システムには, 初心者があやとり紐の操作を誤った際にその誤りを検知し, あやとり紐の正しい操作を伝える機能が求められる。

この課題は, 機械学習における外れ値を検知するためのアルゴリズムである, One Class SVM を本システムと組み合わせて用いることによって解決できる可能性がある。今後は, 使用する機械学習モデルの工夫によって誤った手順を指摘できるかどうか調査する必要がある。

あやとり習得支援アプリケーションの制作

実験によって、本システムはあやとり技の変形工程を高い精度で認識できることがわかった。今後は、本システムを応用した、あやとりの習得支援アプリケーションを制作する。本アプリケーションは、あやとりの変形工程を認識し、次の紐の操作を自動で指示することによってユーザのあやとり習得を支援する。これにより、書籍や動画などの従来の教材で発生していた、「あやとり中に、両手が塞がっているためページをめくったり動画を操作することが難しい」という問題を解消できると考えられる。

6 まとめ

本論文にて導電繊維を編み込んだ紐を用いてあやとり技を認識するシステムである E-String Figures を示した。9 人の実験協力者に対して実験を行い、3 種類のあやとり技の変形工程の認識精度を調査した。実験の結果、本システムは 3 種類の連続技の変形工程をそれぞれ連続技 1 が 0.91、連続技 2 が 0.98 および連続技 3 が 0.82、また、3 種類の連続技の全変形工程を認識した結果 0.87 という F 値で認識できる可能性が示された。また、本システムによって得られた測定値には個人差がなく、システムをキャリブレーションせずに適用可能であることもわかった。今後は、本システムを応用したあやとり習得支援アプリケーションを制作する。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP22K17941, JP24K02968, JP25K03171 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 丸丸武臣, 丹羽孝, 勅使千鶴: 日本における伝承遊び実施状況と保育者の認識, 名古屋市立大学大学院人間文化研究科『人間文化研究』, Vol. 7 (2007), pp. 57–78.
- [2] Blasko, G., Narayanaswami, C., and Feiner, S.: Prototyping Retractable String-Based Interaction Techniques for Dual-Display Mobile Devices, in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '06, New York, NY, USA, ACM, 2006, pp. 369–372.
- [3] Cheung, V., Eady, A. K., and Girouard, A.: Deformable Controllers: Fabrication and Design to Promote Novel Hand Gestural Interaction Mechanisms, in *Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '18, New York, NY, USA, ACM, 2018, pp. 732–735.
- [4] Fellion, N., Eady, A. K., and Girouard, A.: FlexStylus: A Deformable Stylus for Digital Art, in *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, New York, NY, USA, ACM, 2016, pp. 2482–2489.
- [5] 穂積佳, 塚田浩二, 吉田博則: 導電糸を活用した組紐型タンジブル・インタフェースの基礎検討, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), Vol. 2024, No. 24 (2024), pp. 1–7.
- [6] INAX ギャラリー企画委員会: 世界あやとり紀行: 精霊の遊戯, INAX booklet, INAX 出版, 2006.
- [7] 伊藤直史: 電気インピーダンストモグラフィの原理と応用, 計測と制御, Vol. 56, No. 11 (2017), pp. 827–832.
- [8] Klefeker, J. and Devendorf, L.: String Figuring: A Story of Reflection, Material Inquiry, and a Novel Sensor, in *Proceedings of the 2018 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '18, New York, NY, USA, ACM, 2018, pp. 1–6.
- [9] Koch, E. and Witt, H.: Prototyping a Chest-Worn String-Based Wearable Input Device, in *Proceedings of the 2008 International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, WOWMOM '08, California, CA, USA, IEEE Computer Society, 2008, pp. 1–6.
- [10] Leong, J., Parzer, P., Perteneder, F., Babic, T., Rendl, C., Vogl, A., Egger, H., Olwal, A., and Haller, M.: proCover: Sensory Augmentation of Prosthetic Limbs Using Smart Textile Covers, in *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, New York, NY, USA, ACM, 2016, pp. 335–346.
- [11] 松本典子: 伝承あそびと運動感覚, 鳥取短期大学研究紀要, No. 48 (2003), pp. 79–86.
- [12] 永山晃誠, 高田峻介: 導電性あやとり紐を用いた形状変化する入力インタフェース, 第 31 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2023), Vol. 2023, No. 85 (2023), pp. 1–3.
- [13] 永山晃誠, 崔明根, 武山侑輝, 赤田真由, 高田峻介, 志築文太郎: E-String Figures: 導電繊維編み込み紐を用いたあやとり技認識システム, 第 32 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ, WISS 2024, 日本ソフトウェア科学会, 2024, pp. 77–84.
- [14] Nakagaki, K., Follmer, S., and Ishii, H.: LineFORM: Actuated Curve Interfaces for Display, Interaction, and Constraint, in *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 333–339.
- [15] 中村和也, 武持敬太, 東登志夫, 榊原淳, 田中浩二, 小河原格也: 通所事業所における手工芸活動に関する実態調査, 長崎大学医学部保健学科紀要, Vol. 16, No. 2 (2003), pp. 115–120.
- [16] 野田さとみ: あやとりの形象変化に伴う脳内活動につ

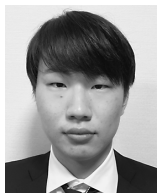
- いて: 近赤外分光法の結果から, 名古屋女子大学紀要. 家政・自然編, 人文・社会編, No. 58 (2012), pp. 179–185.
- [17] 野田さとみ, 佐久間春夫: 手指の運動を伴う遊びにおける脳波および覚醒度・快感度の変化について, バイオフィードバック研究, Vol. 36, No. 1 (2009), pp. 41–46.
- [18] 野田さとみ, 佐久間春夫: 「あやとり」「折り紙」の学習過程における脳波及び心理的变化, バイオフィードバック研究, Vol. 37, No. 1 (2010), pp. 29–36.
- [19] 大橋謙, 塚本啓太, 杉本隼斗, 濱川礼: One-String: CNNを用いたあやとりの工程認識手法と競技性を付加したあやとりゲームの実現, 研究報告エンタテインメントコンピューティング (EC), Vol. 2021, No. 18 (2021), pp. 1–5.
- [20] 岡部恭幸: 幼児期において Disembedding を指導することの意義と可能性, 神戸大学大学院人間発達環境学研究科研究紀要, (2016), pp. 47–52.
- [21] Olwal, A., Moeller, J., Priest-Dorman, G., Starner, T., and Carroll, B.: I/O Braid: Scalable Touch-Sensitive Lighted Cords Using Spiraling, Repeating Sensing Textiles and Fiber Optics, in *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, New York, NY, USA, ACM, 2018, pp. 485–497.
- [22] Olwal, A., Starner, T., and Mainini, G.: E-Textile Microinteractions: Augmenting Twist with Flick, Slide and Grasp Gestures for Soft Electronics, in *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, New York, NY, USA, ACM, 2020, pp. 1–13.
- [23] Ono, K., Iwamura, S., Ogie, A., Baba, T., and Haimes, P.: Textile++: Low Cost Textile Interface using the Principle of Resistive Touch Sensing, in *ACM SIGGRAPH 2017 Studio*, SIGGRAPH '17, New York, NY, USA, ACM, 2017.
- [24] Parzer, P., Probst, K., Babic, T., Rendl, C., Vogl, A., Olwal, A., and Haller, M.: FlexTiles: A Flexible, Stretchable, Formable, Pressure-Sensitive, Tactile Input Sensor, in *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, New York, NY, USA, ACM, 2016, pp. 3754–3757.
- [25] Parzer, P., Sharma, A., Vogl, A., Steimle, J., Olwal, A., and Haller, M.: SmartSleeve: Real-time Sensing of Surface and Deformation Gestures on Flexible, Interactive Textiles, using a Hybrid Gesture Detection Pipeline, in *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, New York, NY, USA, ACM, 2017, pp. 565–577.
- [26] 劉悦怡, 串山久美子: Music yarn: 導電糸組ひもを利用したタンジブル音楽システム, インタラクション 2019 論文集, (2019), pp. 352–365.
- [27] Schoessler, P., Leigh, S., Jagannath, K., van Hoof, P., and Ishii, H.: Cord UIs: Controlling Devices with Augmented Cables, in *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '15, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 395–398.
- [28] Schwarz, J., Harrison, C., Hudson, S., and Mankoff, J.: Cord Input: An Intuitive, High-Accuracy, Multi-Degree-of-Freedom Input Method for Mobile Devices, in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, New York, NY, USA, ACM, 2010, pp. 1657–1660.
- [29] 関森広大, 志築文太郎, 高橋伸: 電気インピーダンス変化に基づき位置識別を行う布型タッチインタフェース, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2018 論文集, Vol. 2018 (2018), pp. 362–368.
- [30] Shahmiri, F., Chen, C., Waghmare, A., Zhang, D., Mittal, S., Zhang, S. L., Wang, Y.-C., Wang, Z. L., Starner, T. E., and Abowd, G. D.: Serpentine: A Self-Powered Reversibly Deformable Cord Sensor for Human Input, in *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, ACM, 2019, pp. 1–14.
- [31] 田實佳郎, 高橋綾子: Future Vision: 私の未来学 圧電性 PLLA によるウェアラブルセンサーの開発: 組紐状の首飾りでストレスなく生体情報を収集: 関西大学システム理工学部 電気電子情報工学科田實佳郎教授, コンバーテック, Vol. 45, No. 7 (2017), pp. 10–14.
- [32] Teschner, E., Imhoff, M., and Leonhardt, S.: *Electrical Impedance Tomography: The realisation of regional ventilation Monitoring*, 2nd edition, 01 2015.
- [33] To, C., Hellebrekers, T. L., and Park, Y.: Highly Stretchable Optical Sensors for Pressure, Strain, and Curvature Measurement, in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IROS '15, 2015, pp. 5898–5903.
- [34] Wicaksono, I., Haddad, D. D., and Paradiso, J.: Tapis Magique: Machine-knitted Electronic Textile Carpet for Interactive Choreomusical Performance and Immersive Environments, in *Proceedings of the 14th Conference on Creativity and Cognition*, C&C '22, New York, NY, USA, ACM, 2022, pp. 262–274.
- [35] Wu, F., Jeon, J., Moon, S. K., Choi, H., and Son, H.: Voice Coil Navigation Sensor for Flexible Silicone Intubation, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 21, No. 2 (2016), pp. 851–859.
- [36] 山田雅之, Budiarto, R., 伊藤英則, 世木博久: アヤトリにおけるひも図形変形過程の表現とその処理, 情報処理学会論文誌, Vol. 35, No. 3 (1994), pp. 497–504.
- [37] 山本紀久子: 指ねじり編みによるアクリルたわしの教材化, 茨城大学教育実践研究, No. 27 (2008), pp. 105–112.
- [38] Yu, T. C., Arakawa, R., McCann, J., and Goel, M.: uKnit: A Position-Aware Reconfigurable Machine-Knitted Wearable for Gestural Interaction and Passive Sensing using Electrical Impedance Tomography, in *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, ACM, 2023.
- [39] Zhang, Y. and Harrison, C.: Tomo: Wearable, Low-Cost Electrical Impedance Tomography

for Hand Gesture Recognition, in *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST '15, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 167–173.

[40] Zhang, Y., Laput, G., and Harrison, C.: Electric: Low-Cost Touch Sensing Using Electric Field Tomography, in *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, ACM, 2017, pp. 1–14.

[41] Zhang, Y., Xiao, R., and Harrison, C.: Advancing Hand Gesture Recognition with High Resolution Electrical Impedance Tomography, in *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, New York, NY, USA, ACM, 2016, pp. 843–850.

[42] Zhu, J., Snowden, J. C., Verdejo, J., Chen, E., Zhang, P., Ghaednia, H., Schwab, J. H., and Mueller, S.: EIT-kit: An Electrical Impedance Tomography Toolkit for Health and Motion Sensing, in *The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '21, New York, NY, USA, ACM, 2021, pp. 400–413.



永山 晃 誠

2001 年生。2024 年神戸市立工業高等専門学校専攻科電気電子工学専攻修了。筑波大学大学院システム情報工学研究群情報理工学位プログラム博士前期課程在学中。ヒューマンインタフェースに関する研究に興味を持つ。ACM, 情報処理学会各学生会員。情報処理学会第 85 回全国大会学生奨励賞, 2022 年度情報処理学会 HCI 研究会貢献賞, 第 32 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2024) 最優秀発表賞 (PC 推薦) など受賞。



崔 明 根

1995 年生。2024 年北海道大学大学院情報科学院博士後期課程終了。博士 (情報科学)。現在, 筑波大学システム情報系研究員。ACM, IEEE Computer Society, 情報処理学会各会員。



武山 侑 輝

1999 年生。2023 年青山学院大学理工学部電気電子工学科卒業。2025 年筑波大学大学院システム情報工学研究群情報理工学位プログラム博士前期課程修了。ヒューマンインタフェースに関する研究に興味を持つ。



赤 田 真 由

1999 年生。2023 年津田塾大学学芸学部情報科学科卒業。2025 年筑波大学大学院システム情報工学研究群情報理工学位プログラム博士前期課程修了。ヒューマンインタフェースに関する研究に興味を持つ。



高 田 峻 介

1993 年生。2015 年神戸市立工業高等専門学校専攻科電気電子工学専攻修了。2021 年筑波大学大学院システム情報工学研究科修了。博士 (工学)。

現在, 神戸市立工業高等専門学校電子工学科准教授。ヒューマンインタフェースに関する興味を持つ。ACM, 情報処理学会, ヒューマンインタフェース学会各会員。



志築文太郎

1971 年生。1994 年東京工業大学理学部情報学科卒業。2000 年同大学大学院情報理工学研究科数理・計算科学専攻博士課程単位取得退学。博士 (理学)。

現在, 筑波大学大学院システム情報系教授。ヒューマンインタフェースに関する研究に興味を持つ。日本ソフトウェア科学会, ACM, IEEE Computer Society, 情報処理学会, ヒューマンインタフェース学会各会員。