

# 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‡

**概要.** 導電繊維を編み込んだ紐を用いることによって、あやとり技を認識するシステムを示す。認識には、導電繊維を編み込んだ紐を用いてあやとりをした際に、紐同士が絡まった接触点において短絡が生じることによって、紐の電気抵抗値が変化する現象を用いる。あやとり技ごとに紐の絡み方が異なるため、抵抗値も異なる。本システムでは、両手の10本指に装着した電極を用いて、あやとり紐の抵抗値を測定し、得られた測定値から機械学習を用いることによってあやとり技を認識する。実験を行い、本システムによる3種類の連続技と呼ばれる技の変形工程を認識したところ、それぞれのF値が0.91, 0.98 および 0.82 という精度で認識できた。

## 1 はじめに

あやとりは、1本の輪にした紐を手をかけ、指を用いてその紐を取るによって様々な形象を作り出す伝承遊びである [15][24]。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 [19]。また、あやとりは海外にも歴史が存在し、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 [4]。

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 [14][21][25]。更に、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 [16][19]。そのため、文化の継承および幼児の発達のためという理由から、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 [15]。

あやとりでは、あらかじめ決まった手順に従って紐を操作する。紐を操作する手順はあやとり技によって数手から数十手にまでおよぶため、あやとり技の習得には時間がかかる。一人であやとりを習得する場合の教材として、主に書籍および動画が挙げられるが、あやとりは両手を同時に扱う遊びであるため、あやとりをしながら途中で書籍のページを捲ったり、動画を再生/停止することが難しい [19]。そのため、あやとり技の作成段階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教材が求められる。

そこで今回我々は、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：E-String Figuresを開発した。本システムは、導電繊維を編み込んだあやとり紐（以下、導電性あやとり紐）の電気抵抗値を、10本の指の甲部分に電極を装着した手袋を用いて測定することによって、あやとり技を認識する。認識に導電繊維を編み込んだ紐を用いるため、カメラを用いるあやとり技認識手法とは異なり、環境光およびオクルージョンの影響を受けない [20]。また、導電性あやとり紐は容易に作製できるため、ユーザの手の大きさに合わせて紐の長さを調整できる。

## 2 関連研究

本システムでは、導電繊維を編み込んだ紐を用いてあやとりをした際に、紐同士が絡まった接触点において短絡が生じることによって、紐の電気抵抗値が変化する現象を用いてあやとり技を認識する。したがって、本節では紐状インタフェース、およびあやとり技の認識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認識するもの [1][6][7][9][10][22]、スリットが入った光ファイバを内蔵したもの [2][3][12]、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 [13]、および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 [11] などが提案されている。

また、導電繊維を編み込むことによって作製され

Copyright is held by the author(s).

\* 筑波大学 情報理工学位プログラム

† 日本学術振興会

‡ 筑波大学 システム情報系

§ 神戸市立工業高等専門学校 電子工学科

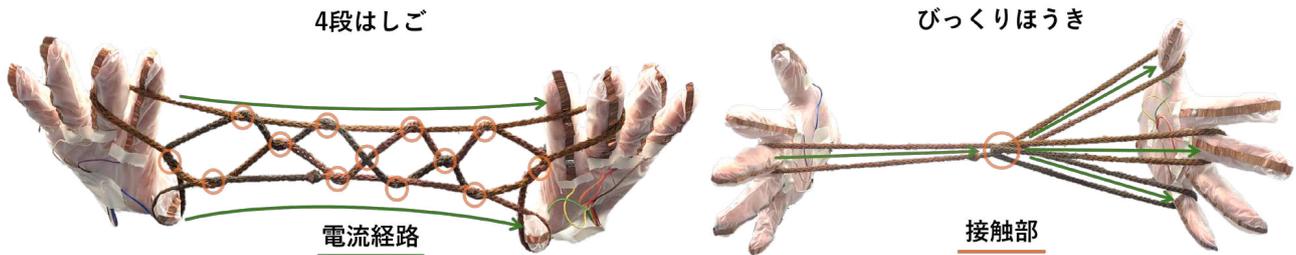


図 1. 導電性あやとり紐の技 (絡まり方) ごとの紐同士の接触点および紐中の電流経路。

た紐状インタフェースも研究されている。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の検出を行うもの [9][26]、皮膜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 [8][9] などが提案されている。更に、穂積ら [23] は、導電繊維を編み込んだ組紐の、引っ張りおよび無ずんだ際の電気的特性を評価することによって、この組紐をタンジブル・インタフェースとして活用するための基礎検討を行っている。

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抵抗値変化を用いて、あやとり技を認識するという点で異なる。

## 2.2 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 [20]、および導電繊維を用いる手法 [5] が提案されている。

One-String [20] 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 4 工程における紐形状を認識している。認識にユーザがあやとりをしている様子を撮影したカメラからの映像を用いるため、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の部分をトリミングしているが、その精度は約 6 割との報告がなされている。また、映像にあやとり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る。

String Figuring [5] 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、センサとして用いられている。チューブおよび芯材の間に、紐全体を 5 等分する位置に銅箔電極が配置されている。また、銅箔および回路を接続するための信号線もチューブおよび芯材の間に内蔵されている。

本システム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、紐の中心に針金が通されているため紐が固く、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、導電繊維を編み込んだ紐を用いるため、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の抵抗値を測定するため、紐が柔軟であり、複雑な技を作ることも可能である。

## 3 E-String Figures

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：E-String Figures を示す。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 1 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（紐上の位置＝接触点、一箇所絡まる本数など）はあやとり技毎に異なる。また各指が触れる紐上の位置もあやとり技毎に異なる。

そこで我々はあやとり技を認識するために、導電繊維を編み込んだ紐と、各指に取り付けた電極を用いる。あやとり技が異なれば、図 1 に示されるように、あやとり技毎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、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、他の指の電極において計測される電位の違いとなって現れる。

本システムは両手 10 本の指に設けた電極の電極間の抵抗値を測定し、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構成要素を述べる。本システムは、紐に流れる電流を測定するシステム、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。



図 2. 導電繊維編み込み紐.



図 3. 銅テープを貼り付けたした手袋.

### 3.2.1 紐電流測定システム

紐に流れる電流を測定するシステム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 2 に示す. 我々はこの紐を, 導電繊維 (フジックス, Smart-X) 3 本および非導電性の刺繍糸を束ねたものをアイコンドニッター (AZ-Front, YL-508) を用いてリアン編み [5][18] 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.

#### 測定回路および測定用プログラム

作製した手袋を図 3 に, 抵抗値を測定するための回路を図 4 に示す. 本システムでは指の甲部分に電極として銅テープを貼り付けた手袋を用いることによって電極間の紐の抵抗値を測定する. また図 4 の回路はこの抵抗値を測定するための分圧回路である.

電極はマイコン (Arduino Mega) のデジタルピンならびにマルチプレクサ (SparkFun, BOB-09056) に並列に接続されている. マルチプレクサの Sig ピンは  $270 \Omega$  の抵抗器を介して接地されており, かつマイコンのアナログピンに接続されている.

マイコンで動作するプログラムは, 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 と接続した上でアナログピンの電位を記録する. したがって,  $10$  (通りの印加電極)  $\times 9$

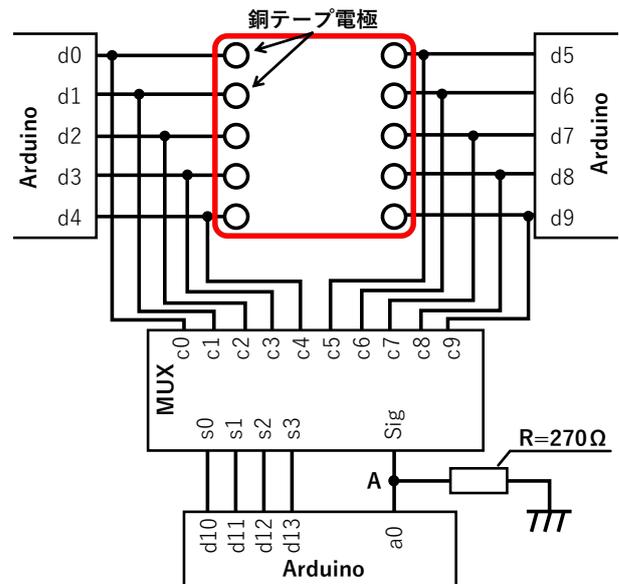


図 4. 電流測定回路. 図中では 1 個の Arduino を 3 つに分割 (左上部, 右上部, 下部) して表記している.

(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  $100 [\text{Hz}]$  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 上で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 Random Forest 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) を一回終了後の状態を 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, 各技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生成する.

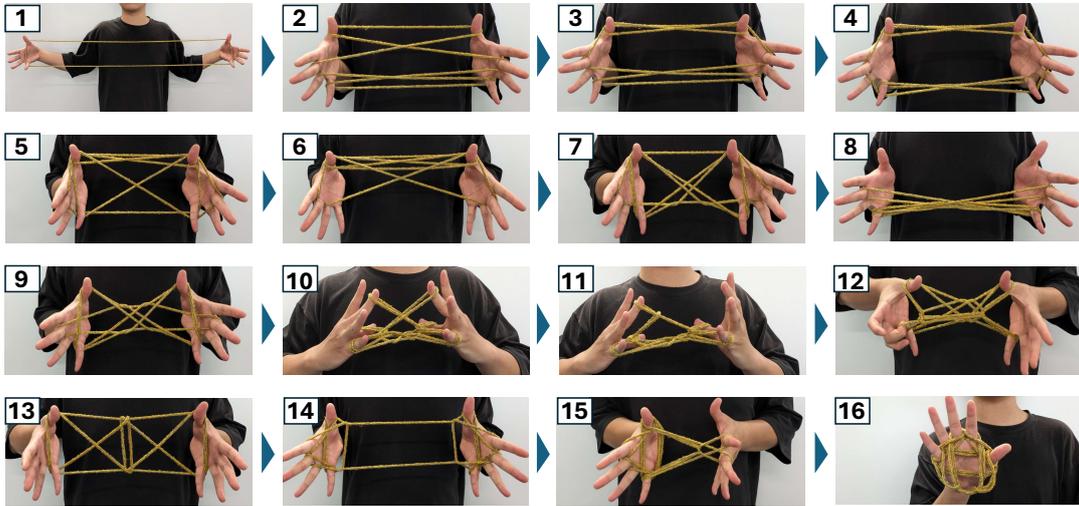
## 4 検証

本システムによるあやとり技の認識精度を調査するために実験を行った. 実験では, 図 5 に示す連続技と呼ばれる技 3 種類の各変形工程における紐の電圧を測定した.

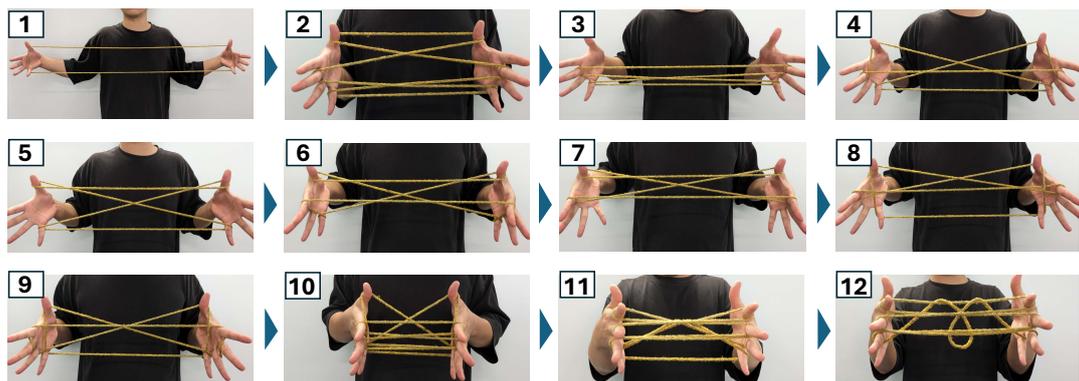
### 4.1 あやとり変形工程の定義

山田ら [17] 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」は紐を指を用いて取る動作, 「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」は同一の紐にかかっている 2 本の紐において, 内側の紐および外側の紐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

連続技1 (くり, すべり台, かめ, かみしばい, ゴム, 飛行機, かぶと)



連続技2 (ふじさん, つき)



連続技3 (4段はしご, 東京タワー)

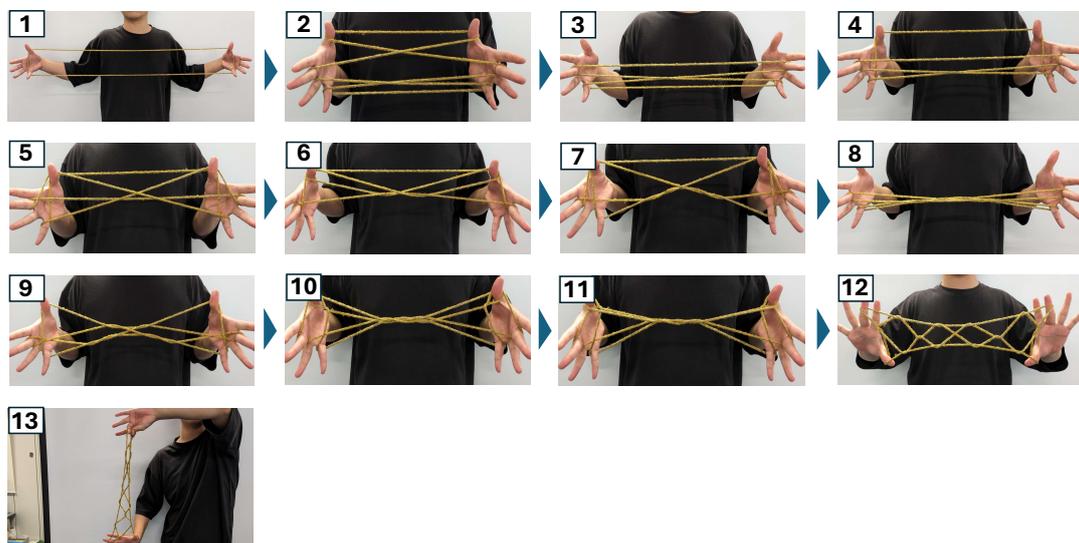


図 5. 各連続技の変形工程.

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、すべて片手の指一本の動作を表す。この基本動作を基に、実験にて認識する対象となる連続技の変形工程を実験にて測定するあやとり技の変形工程を定義した。実験では、あやとり操作の簡略化のために、いくつかの基本動作を組み合わせたものを新たな動作として定義した。まず、一本の指にかかっている紐を取り、かつその指から紐を外す動作をまとめて「掛け替える」動作とした。また、「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。そこで、本論文では基本動作である「入れ替える」を「ナバホ取り」として扱った[17]。「ナバホ取り」は「入れ替える」動作および「外す」動作を組み合わせた動作、すなわち、同一の指にかかっている2本の紐の内、下の方の紐のみを外す動作である。加えて、同一の指に複数の紐が掛かっており、これらの紐に対して同じ動作を繰り返し行う場合、これらの動作をまとめて一つの動作とする。更に、左右対称の紐形状から対象の位置にある紐同士に対して、両手の同一の指を用いて連続していずれかの動作を行う場合、これらをまとめて一つの動作とする。

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。しかし図5に示した連続技1の14工程目から15工程目では、左手の親指から右手の親指、および左手の小指から左手の親指に紐を「掛け替える」動作をまとめて1工程とした。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本の指の動作をまとめている。更に、連続技2の12工程目、「つき」は紐をあえて弛ませることによって、紐図形中心に小さな輪を浮かべる工程である。「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名の実験協力者（男性8名、女性1名、平均年齢=23.0歳、SD=0.93）に対して実験を行った。図3にて示した紐電流測定用手袋を実験協力者が装着した後に、著者が実験協力者に紐の操作を教えながら測定を開始した。3つの連続技の各工程につき50回（約3秒間）測定値を記録し、各連続技のすべての工程を終えた後一度紐を指から外すように指示した。これを1セッションとし、一つの連続技を5セッション続けて測定した。これを3つの連続技にて行い、それぞれの変形工程は連続技1は16工程、連続技2は12工程、連続技3は13工程であるため、一人当たり(16+12+13) [工程]

表 1. LOSO 交差検証による F 値.

実験協力者	連続技 1	連続技 2	連続技 3
P <sub>1</sub>	0.94	0.98	0.90
P <sub>2</sub>	0.96	1.00	0.87
P <sub>3</sub>	0.95	1.00	0.89
P <sub>4</sub>	0.73	1.00	0.75
P <sub>5</sub>	0.92	1.00	0.81
P <sub>6</sub>	0.65	0.94	0.79
P <sub>7</sub>	0.87	0.98	0.84
P <sub>8</sub>	0.92	1.00	0.79
P <sub>9</sub>	0.92	0.99	0.78
P <sub>ave</sub>	0.87	0.99	0.82

× 50 [回] × 5 [セッション] = 10,250 [個] のデータが収集された。なお、測定中は実験協力者に「紐をぴんと張った状態」を保つように指示した。

#### 4.3 実験結果

9 人の実験協力者から得られたデータを用いて、RandomForest 分類器を生成し、各技の変形の認識精度を算出した。各実験協力者における、各連続技ごとの Leave-one-session-out (LOSO) 交差検証の結果を表 1 に、各連続技ごとの Leave-one-participant-out (LOPO) 交差検証の結果の混同行列を図 6 にそれぞれ示す。LOPO 交差検証の結果、各連続技の F 値は、それぞれ連続技 1 : 0.91, 連続技 2 : 0.98, 連続技 3 : 0.82 であった。

#### 4.4 考察

結果から、本システムは全ての連続技の変形を 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、導電繊維を編み込んだ紐の抵抗値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 交差検証によって得られた F 値、および LOPO 交差検証によって得られた F 値の間に大きな差が見られないことから、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、連続技 3 が他 2 つの連続技と比較して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 6c 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、各工程は、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

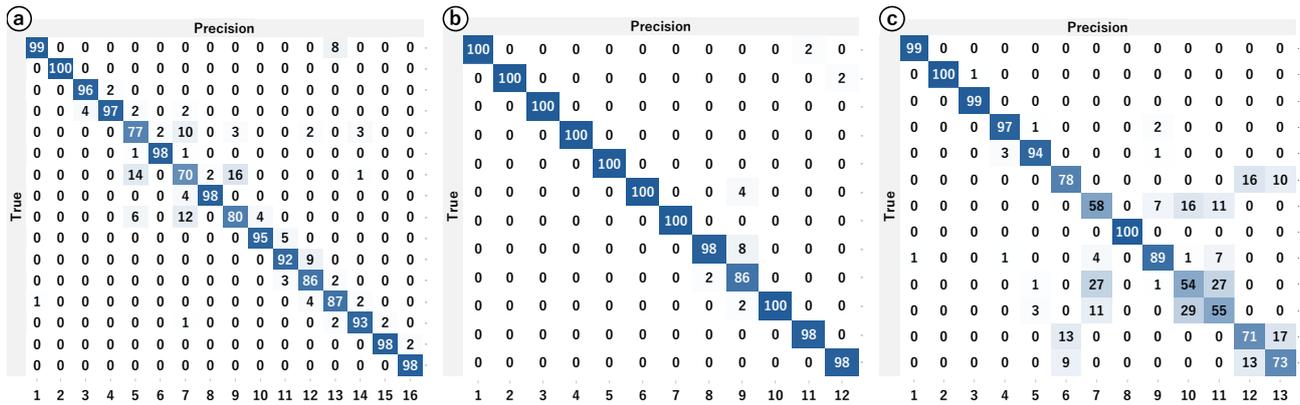


図 6. LOPO 交差検証の結果の混同行列 (a: 連続技 1, b: 連続技 2, c: 連続技 3).

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。しかし、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。

## 5 今後の課題

### 技ごとの分類モデル生成の必要性

本システムでは 3 種類の連続技を認識したが、それ以外の多くのあやとり技を認識するためには、それぞれのあやとり技ごとに分類モデルを新たに生成する必要がある。そのため、あらゆるあやとり技を認識するにあたって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生成した分類器においても高い精度であやとり技を認識することがわかった。したがって、本システムでは認識できる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、あやとりの初心者の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。

これを達成するために、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 など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。したがって、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。そのためこのアプリケーションには、書籍および動画などの従来のあやとりの教材とは異なり、あやとりの操作中に両手が塞がってしまうことによってページを捲ったり、動画を再生/停止することができないという問題がないと考えられる。

## 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、連続技と呼ばれる技 3 種類の制作工程の認識精度を調査した。実験の結果、本システムは連続技 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、本システムによって得られた測定値には、個人間の差がなく、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。

## 参考文献

- [1] G. Blasko, C. Narayanaswami, and S. Feiner. string-based interaction techniques for dual-display mobile devices. In *Proceedings of the*

- SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '06, pp. 369–372, New York, NY, USA, 2006. Association for Computing Machinery.
- [2] V. Cheung, A. K. Eady, and A. Girouard. 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, pp. 732–735, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
  - [3] N. Fellion, A. K. Eady, and A. Girouard. 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, pp. 2482–2489, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
  - [4] 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.
  - [5] J. Klefeker and L. Devendorf. String Figuring: A Story of Reflection, Material Inquiry, and a Novel Sensor. In *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '18, pp. 1–6, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
  - [6] E. Koch and H. Witt. 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, pp. 1–6, USA, 2008. IEEE Computer Society.
  - [7] K. Nakagaki, S. Follmer, and H. Ishii. LineFORM: Actuated Curve Interfaces for Display, Interaction, and Constraint. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST '15, pp. 333–339, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
  - [8] A. Olwal, J. Moeller, G. Priest-Dorman, T. Starner, and B. Carroll. 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, pp. 485–497, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
  - [9] P. Schoessler, S.-w. Leigh, K. Jagannath, P. van Hoof, and H. Ishii. Cord UIs: Controlling Devices with Augmented Cables. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '15, pp. 395–398, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
  - [10] J. Schwarz, C. Harrison, S. Hudson, and J. Mankoff. 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, pp. 1657–1660, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
  - [11] F. Shahmiri, C. Chen, A. Waghmare, D. Zhang, S. Mittal, S. L. Zhang, Y.-C. Wang, Z. L. Wang, T. E. Starner, and G. D. Abowd. 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, pp. 1–14, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
  - [12] C. To, T. L. Hellebrekers, and Y.-L. Park. Highly Stretchable Optical Sensors for Pressure, Strain, and Curvature Measurement. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5898–5903, 2015.
  - [13] F. Wu, J. Jeon, S. K. Moon, H.-J. Choi, and H. Son. Voice Coil Navigation Sensor for Flexible Silicone Intubation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(2):851–859, 2016.
  - [14] 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*, 36(1):41–46, 2009.
  - [15] 穂丸武臣, 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』*, 7:57–78, 2007.
  - [16] 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*, 特別:47–52, 2016.
  - [17] 山田雅之, R. Budiarto, 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*, 35(3):497–504, 1994.
  - [18] 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*, (27):105–112, 2008.
  - [19] 松本典子. 伝承あそびと運動感覚. *鳥取短期大学研究紀要*, (48):79–86, 2003.
  - [20] 大橋錬, 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)*, 2021(18):1–5, 2021.
  - [21] 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*, 16(2):115–120, 2003.
  - [22] 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*, 45(7):10–14, 2017.
  - [23] 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)*, 2024(24):1–7, 2024.

- [24] 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, (58):179–185, 2012.
- [25] 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, 37(1):29–36, 2010.
- [26] 劉悦怡樹, 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, pp. 352–365, 2019.