

遠隔の初学者と経験者が共同で電子工作を行う 製作ツールの提案

矢作 優知^{1,a)} 松井 克文^{1,b)} Hautasaari Ari^{1,c)} 韓 燦教^{1,d)} 富木 菜穂^{1,e)} 苗村 健^{1,f)}

概要：電子工作は様々な場所で手軽に楽しめるものづくりだが、特にマイクロコントローラを使う場合はプログラミングと電子回路を統合する必要があるため、初学者は様々な困難に直面する。このため経験者と共同で製作する機会を得られることが望ましいが、経験者が常に初学者と同じ空間にいるとは限らない。そこで本研究の目的を、遠隔の初学者と経験者が共同でマイコンを使った作品を製作し、電子工作を効果的に学ぶことができる製作ツールの実現とする。共同製作ツールや電子工作における協調学習の研究を参照し、カメラ映像の拡大・移動機能と同時操作機能をもち全てのツールを常時一覧可能な製作ツールを提案する。初学者の電子工作能力を実験後に評価したところ、提案ツールを使った初学者の方が高いパフォーマンスを発揮する可能性が示唆された。

1. はじめに

メイカームーブメントの広まりによって多様な人々が電子工作に取り組むようになってきている。この背景には Arduino や Raspberry Pi をはじめとするオープンソースのマイコンボードの普及やオンラインコミュニティなどを通して製作方法や他のメイカーのプロジェクトに関する情報を入手しやすくなったことがある [1]。電子工作は安価な電子部品とパソコンのみで製作を進めることもでき、大きな装置や騒音を発生させる機器を使う必要がなく、家庭を含む様々な環境で手軽に楽しめる。

ところが、特にマイクロコントローラ（以下、マイコン）を使った電子工作では、電子回路とプログラミング双方の知識を身につけこれら 2 つの領域を組み合わせるものづくりをする必要があるため、初学者は様々な困難に直面する [2]。初学者の製作を支援するため、ヒューマンコンピュータインタラクション（HCI）の領域では様々なインタラクティブツールが提案されてきた（例: [3], [4], [5]）。一方で、電子工作のうち複雑あるいは主観的な部分（例えばプロジェクト範囲の決定やデバッグの過程）の支援など人間による支援が適した場面もあり、対面環境だけでなく遠隔環境でも人間による支援を実現することが望まれる [6]。



図 1 提案ツールを用いた共同電子工作の様子

そこで本研究では、遠隔の初学者と経験者が共同でマイコンを使った作品を共同製作するためのツールを提案する（図 1）。

2. 関連研究

電子工作を支援する経験者と初学者の間の同期コミュニケーションを支援するツールの研究としては、RobotAR [7] や Remote Assistance Platform [8] がある。これらは、AR (Augmented Reality) で電子回路上にアノテーション等を表示してコミュニケーションを支援する手法である。また、視線計測装置で計測した初学者と経験者の注視位置を可視化することで電子工作の学習効果が高まることを示した研究もある [9]。これらの研究は物理的な製作物である電子回路の製作を通して電子工作を学ぶ際に有用な情報提示の方法を示しているが、その有用性は事前に用意された共通の製作課題に実験参加者が取り組む場合において示されている。実際の電子工作では製作者自身の興味に基づい

¹ 東京大学

a) yahagi@hc.ic.i.u-tokyo.ac.jp

b) matsui@hc.ic.i.u-tokyo.ac.jp

c) ari@hc.ic.i.u-tokyo.ac.jp

d) hanc@hc.ic.i.u-tokyo.ac.jp

e) tomiki@hc.ic.i.u-tokyo.ac.jp

f) naemura@hc.ic.i.u-tokyo.ac.jp

た自由な製作が行われる場合もあるが、初学者の自由製作を支援する場合は経験者にも完成形がわからないため、経験者も初学者とともに製作物に対する理解を深めながら製作を進める。このため、初学者と経験者のインタラクションだけでなく、経験者と製作物のインタラクションも必要である。しかし、アノテーションや注視位置の可視化は経験者-初学者間のインタラクションを支援する手段であり、経験者-製作物間の直接的なインタラクションを支援するものではない。したがって、経験者が積極的に製作物の振る舞いを確認したり、製作物を編集したりすることはできない。

他方で、電子工作における遠隔地の製作物とインタラクションするためのツールとしては、Heimdall [4] や WireOn [5] が提案されている。これらのツールは電圧測定や回路の組み替えなどの機能を備えており遠隔地からのデバッグを可能にする。Heimdall のユーザスタディでは全ての研究参加者が電子回路のデバッグに成功しており、経験者による電子工作の遠隔支援の可能性を示している [4]。一方、これらのツールでは経験者が一人でデバッグする場面を主に想定しており、初学者と共同製作することを十分に検討していない。どちらのツールもロボットアームが回路の周囲を動き回るため初学者が回路に触りにくい。また、インタフェースを複数人で使う方法は議論していない。

このように、初学者と経験者のリアルタイム共同製作を支援するツールの研究と、遠隔の製作物とのインタラクションを支援するツールの研究は別々に行われてきた。Virtual Makerspaces という物理的な製作物を遠隔共同製作するためのツールが提案されているが、萌芽期の研究であり評価はまだ十分に行われていない [10]。RobotAR にはカメラが走行して回路を観察する視点を変更する機能はあるが、電圧測定や製作物の制御はできない [7]。またどちらも、物理的な製作物の共有に力点が置かれておりプログラミングを共同で行う方法の議論は少ない [7], [10]。以上のように、経験者と製作物のインタラクションを支援するツールを電子工作のリアルタイム共同製作場面で活用することの効果に関する研究は不足しているのが現状である。

3. ツールの設計

本研究では遠隔の初学者と経験者の双方が製作物とインタラクションしながら共同で電子工作に取り組み、電子工作を効果的に学ぶことができる製作ツールを提案する。ツールの設計は共同製作ツールや電子工作における協調学習の研究を参照しながら行なった。

3.1 ベースラインの構成

まず初めに、既存のツールの組み合わせによって実現可能なベースラインとなる製作ツールの構成について検

討する。ベースラインの構成はニューヨーク大学の ITP (Interactive Telecommunications Program) が公開しているフィジカルコンピューティングの遠隔学習ツールに関する資料 [11] を参考に決定した。この資料では、電子工作の遠隔学習に必要なツールを Video Tools, Text Tools, Drawing Tools, Connected Tools の 4 種類に分類して紹介している。4 つの分類それぞれについて用意するツールを検討し、図 2 に示す開発環境を構成した。

Video Tools は回路を映像により共有するためのツールである。回路を撮影するカメラとしては、スマートフォン、USB 顕微鏡、書画カメラなどが活用できる。多くの人が所持しているスマートフォンをスタンドに取り付けることで、書画カメラのように利用できる [11]。本研究では微細な部品は用いないため、顕微鏡は不要である。

Text Tools はマイコンのプログラムを共有するツールである。遠隔地の人と共同で開発する場合は、ネットワークを介してソースコードを共有する仕組みが必要である。そこで、リアルタイム共同編集機能 Live Share が利用できる Visual Studio Code^{*1}を利用した。

Drawing Tools は回路を図で表してコミュニケーションを行うためのツールである。回路図や実体配線図を描画するためのツールの利用が勧められているが [11]、本研究では共同編集可能でシンプルなホワイトボードアプリ^{*2}を利用することにした。これは短時間の実験中に多くのツールの利用方法を学習することは学習者にとって負荷が高いと考えたためである。

Connected Tools はコンピュータに接続可能な測定器である。マイコンを使った電子工作では、デバッグの際に PWM やシリアル通信の波形を確認する必要があるため、本研究では USB オシロスコープを用いることにした。

4 種類の製作ツールに加えて、本研究では共同ウェブブラウザ^{*3}も用意した。電子工作する際は電子部品やマイコンの使い方を知るためにデータシートやリファレンスマニュアルを参照する必要がある。また、デバッグ時には検索エンジンで解決策を探すこともある。これらを共同で行えるように、スクロールやタブが同期される共同ウェブブラウザを用いた。

以上のツールは全てが一覧できるように配置した。マイコンを使った電子工作ではソフトウェアとハードウェアの対応づけを把握することが重要であり、学習者は例えば物理的な製作物、回路図、および画面上のソースコードを見渡したり指でなぞったりしながら対応を理解していく [12]。このような活動はソフトウェアとハードウェアに関する情報を同時に見渡すことを可能にするツールによって支援できる [3]。ノートパソコンに外部ディスプレイを接続し、外

^{*1} <https://code.visualstudio.com>

^{*2} <https://witeboard.com>

^{*3} <https://www.remotehq.com>

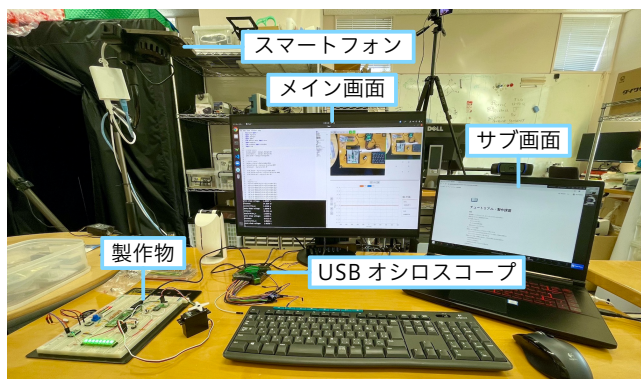


図 2 ハードウェアツールの構成と机上での配置

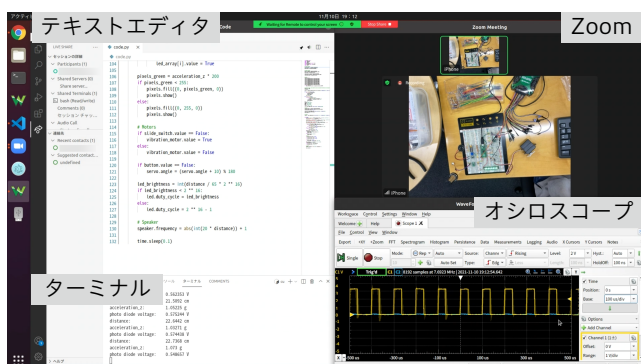


図 3 ベースライン構成におけるメイン画面の表示

部ディスプレイ（以下、メイン画面）にテキストエディタ、回路の映像およびオシロスコープを表示し（図 3）、ノートパソコンの内蔵ディスプレイ（以下、サブ画面）に共同 web ブラウザを表示した（図 4）。メイン画面内では図 3 のように 3 つのウィンドウを重複なく並べることで一覧できるようにしている。

ツールを並べたデスクトップ画面はビデオ会議ツール（Zoom）の画面共有機能によって遠隔地の経験者と共有する。本研究では画面共有の遠隔操作も有効化することで経験者が初学者のパソコンを操作できるようにした。初学者のパソコンでは Visual Studio Code、オシロスコープ、Zoom がメイン画面に配置され、経験者のパソコンでは Visual Studio Code と Zoom が配置されることになる。経験者が画面共有のための Zoom に加えて Visual Studio Code を起動する必要があるのは、同時編集機能である Live Share を利用するためである。

3.2 ベースライン構成の問題点

以上で述べたベースライン構成には、遠隔の初学者と経験者が共同で電子工作を行うツールとしては 3 つの問題がある。

映像の拡大や移動ができない 電子工作では数 mm 程度の電子部品を使う。このためカメラ映像を拡大しなければ製作物の状況を正確に把握できない。製作物とカメラを近づけることもできるが、そのような初学者が製



図 4 サブ画面に表示した共同ウェブブラウザ

作者とカメラマンのひとり二役を果たす必要がある状態は初学者にとって過大な負担になる [7]。このため、遠隔地の経験者がカメラを操作可能になっていることが望ましい。

同時にひとりのユーザーしか画面操作できない 画面共有の遠隔操作機能ではパソコンのカーソルを遠隔地から操作可能だが、カーソルが 1 つしかないため複数人が同時に操作できない。このため、経験者が編集やツールの操作による支援を行いにくなり、口頭で指示をする形での支援が多くなってしまいうだろう。また、ポインター等を活用すると相手の注意を製作物の注目してほしい箇所に誘導できるが [9]、同時操作ができない場合はポインティングにより初学者の操作が中断されてしまう。ツールが容易に使用可能なことで経験者が初学者とのインタラクションに集中できるため [9]、画面共有へのアノテーション機能のようなモードを切り替えて使う必要がある機能では不十分だと考えられる。ソースコードは Visual Studio Code で共同編集が可能だが、画面共有と Visual Studio Code のウィンドウを切り替える必要があり面倒である。よって、お互いの操作に干渉せずに 2 人が同時に操作可能なインタフェースが必要である。

各ツールのウィンドウが固定されていない 前述の通り、電子工作では物理的な製作物やソースコードなどを見比べながら製作が進められる [12]。ベースラインツールでも全てのツールを見渡しやすいようにウィンドウを配置可能である。しかし、1 つのツールだけを拡大して表示するなど配置を崩してしまうことも想定される。一度配置を崩すと元に戻すには手間がかかるため、製作中にソフトウェアとハードウェアを見比べることが少なくなる可能性がある。初学者側の画面の配置が崩されると経験者が確認したい情報が隠される原因にもなる。他方、経験者側の画面で配置が崩されると初学者が抱えている問題に経験者が気づくまでに遅れが生じる原因になる可能性がある。これらのことから、ソフトウェアとハードウェアを一覧しやすいようにツールをデザインすることが望ましい。

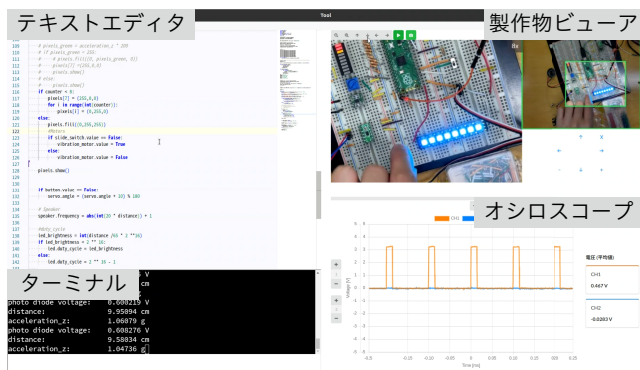


図 5 提案ツール

3.3 提案ツールの機能

提案ツールは前述の3つの問題点を解決し、遠隔の経験者も製作物とインタラクションしやすいように設計した。提案ツールはテキストエディタ、ターミナル、製作物ビューア、オシロスコープの4つで構成されている(図5)。製作物ビューアは映像の拡大縮小および移動の機能を備えている。テキストエディタやターミナルは共同編集可能とし、製作物ビューアやオシロスコープは拡大縮小操作やレンジの変更を他の操作と並行して実行可能にすることで、同時操作を実現する。画面の配置は固定することで、初学者と経験者が常に全てのツールを一覧できるようにした。プローブが回路に接続されていないときのオシロスコープ画面など、使っていない機能を隠すあるいは小さく表示する方が主に利用しているツールを見やすくなることも考えられるが、今回は一覧表示することを優先した。

以上のような機能を持った提案ツールを使うことで、どのような共同電子工作が可能になるだろうか？製作物の「ボタンを押した回数に応じた個数のLEDが光る」という機能をデバッグしている場面を想定して、具体的に説明する。

一通りの配線とコーディングを終え動作確認をしたところ、初学者はボタンを1回押しただけで2個以上のLEDが点灯してしまうというバグに気づく。配線やソースコードを確認しても問題がありそうな箇所を見つけられなかったため、経験者に支援を求める。

3.3.1 カメラ映像の拡大や移動

そこで経験者はまず、カメラ映像を拡大してボタンやLEDの配線がマイコンに正しく接続されていることを確認する。カメラ映像を拡大することで、ブレッドボード上のどの列に配線が刺さっているかという情報が遠隔地からでも確実に確認できる。これにより、バグがある場合は経験者は見落とさずに発見でき、バグがないときは自信を持って次のデバッグ段階に進むことができる。経験者が映像を拡大する様子は初学者に対してもオープンになっているため、初学者はデバッグ時に経験者がどのような部分に注目するかを学ぶこともできる。

3.3.2 同時操作

配線に問題がないことがわかったため、経験者は次にLEDを点灯させる個数を保存している変数の値を確認することを提案する。変数の値を出力するコードを適切な位置に挿入する必要があるが、カーソルやハイライトによって挿入すべき位置を指し示すことで、記述すべき位置をスムーズに伝えることができる。同時操作が可能であるため、ポインティング操作が初学者がコードを書く操作を妨害することはない。初学者が記述すべきコードがわからない場合は、経験者が直接コードを書いて伝えることもできる。これは口頭でコードを説明するよりもスムーズである。また、初学者がソースコードを記述している作業と並行して、経験者がカメラの注目箇所を問題のLEDに移動させる操作ができる。

3.3.3 ツールの一覧表示

変数の値を出力することで、ボタンを1度押しただけで複数回押されたと判定されていることが明らかになった。そこで経験者はチャタリングが発生しているのではないかと考え、ボタンからの入力信号をオシロスコープで確認することを提案する。経験者はカメラ映像の上でカーソルを動かして配線やピンを指し示しながら、初学者にオシロスコープのプローブの接続方法を教える。プローブを繋ぎ終えた初学者は製作物を動作させて波形を確認する。提案ツールではソースコード、ターミナル、回路、オシロスコープが一覧できるため、それら4つを見比べながら自分が作り込んだプログラムおよび回路と動作結果の関係を把握することが容易である。

はじめオシロスコープの時間レンジが大きい値になっていたため、ボタンが押されたタイミングで電圧がきれいに変化しているように見えたが、経験者が時間レンジを小さくすることで電圧が振動している様子が観察される。経験者が自らオシロスコープを操作できるため、口頭でボタンを押す回数を指示するよりも容易に調整が可能である。経験者が現象を理解しやすくなるようにツールを操作して支援することで、初学者はバグの原因に気づくとともにチャタリング現象を理解できている。バグの原因がわかった初学者は、チャタリングの波形とプログラムを見比べながら解決策を考える。そして、少し時間が経てば信号の値が変化しなくなることに注目し、一定時間同じ値が得られることを確認するようプログラムを書き換える。この修正により、バグは修正された。

4. 実装

4.1 利用するハードウェアツール

製作に利用するハードウェアツールは全て既製品を用いた。用意したハードウェアツールは、ノートパソコン、外部ディスプレイ、ワイヤレスキーボード、ワイヤレスマ

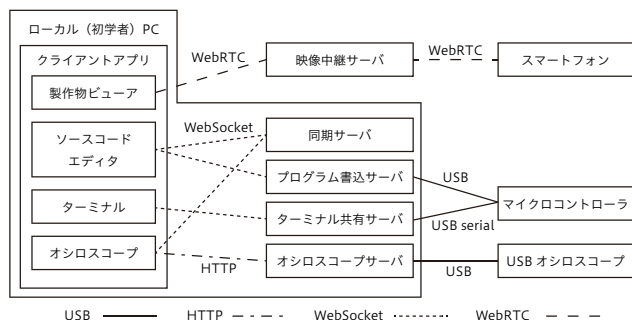


図 6 システムの構成

ウス、スマートフォン、USB オシロスコープである。スマートフォンは画角の異なるカメラを3つ搭載している iPhone 12 Pro を用いた。USB オシロスコープとしては Digilent 社の Analog Discovery 2^{*4}を利用した。なお、利用するハードウェアツールはベースライン構成でも同一である。

4.2 システムの構成

システムの構成を図 6 に示す。ツールはクライアントアプリケーションと複数のサーバからなる。クライアントアプリケーションは初心者および経験者のノートパソコンで実行されコーディングや回路の確認をするためのインタフェースとなる。クライアントアプリケーションは JavaScript で Web アプリケーションとして開発した。サーバは電子回路があるローカルのパソコン（初心者が使うノートパソコン）で実行され、クライアントアプリケーションからのハードウェアへのアクセスやデータの同期を可能にする。スマートフォンからの映像中継は Twilio Video^{*5}を用いて開発し、iPhone のマルチカメラを使った拡大・移動機能を実装した。

5. 評価実験

提案ツールがベースライン構成と比較して、電子工作を
学びやすいツールになっているか評価した。

5.1 方法

実験には初学者 6 名と経験者 1 名が参加し、経験者が初学者 6 名と 1 人ずつ合計 6 回共同電子工作した。初学者はプログラミング経験があり、マイコン使用経験がない大学生である。経験者は電子工作の授業でティーチング・アシスタントの経験がある大学生から募集した。

実験の所要時間は3時間であり，製作時間はそのうちのおよそ2時間とした．製作時間の前半45分程度でマイコンの基本的な使い方を身につけるチュートリアルを実施し，残りの1時間10分程度は自由製作の時間とした．自

*4 [https://digilent.com/reference/
test-and-measurement/analog-discovery-2/start](https://digilent.com/reference/test-and-measurement/analog-discovery-2/start)

*5 <https://www.twilio.com/video>

表 1 回路デザインタスクの評価結果

回路の特徴	ベースライン [人]	提案ツール [人]
接続	0	2
極性・接地	0	2
電流の流れ		
- 配線の不足	1	0
- 冗長な配線	1	0
- ショート	1	0
回路が機能する	0	2

由製作のテーマは「インタラクティブ・ギフトボックスのしかけを作ろう」とし、電子工作によりもらった人がびっくりするようなプレゼント箱のしかけを自由に考えて製作するよう求めた。製作に使用したマイコンは Raspberry Pi Pico である。実験の最後に初学者に評価用のタスクに取り組むよう依頼し、製作終了後の初学者の電子工作能力を評価した。実験条件は Zoom 等のベースライン構成のツールを用いる条件と提案ツールを用いる条件の2つとし、各条件に3名ずつの初学者が参加した。

電子工作能力の評価には Litts らの手法を用いた [13]. この手法はプログラムと回路を対応づけながら行う「回路デザインタスク」と「プログラムリーディングタスク」を学習者に課して学習者のパフォーマンスを評価するものであり [13], マイコンを使った電子工作を対象とする本研究に適している. 課題で用いる回路とプログラムは本研究の自由製作に合わせて, Raspberry Pi Pico でボタンや温度センサの入力に応じて LED の光り方を変化させるものにした. 初学者が課題に取り組む様子およびデザインした回路を撮影し, デザインした回路の正しさとプログラムについて説明できた度合いを Litts らの基準に基づいてコーディングした [13]. 本研究では回路デザインタスクが Litts らのものより複雑であるため, ボタン, 温度センサ, LED それぞれの回路に分けてコーディングを行った.

5.2 結果

回路デザインタスクの結果を表 1 に示す。表の数字は回路の各特徴について 3 人中何人の初学者が正しく設計できたかを示している。ただし、電流の流れに関する特徴については不適切な設計をした人数を示している。前述のとおり回路を 3 つの部分に分けてコーディングを行ったが、ここでは紙面の都合ですべての部分の正しく設計できた人数を示す。ベースラインでは全員が回路を正しく設計できなかったように見えるが、LED については正しく設計できた初学者もいる。提案ツール条件の方が回路を正しく設計できた人数が多かった。

プログラムリーディングタスクの結果を表 2 に示す。表の数字は説明の中で 3 人中何人の初学者が各説明項目に触れたかを示している。ベースライン条件の初学者の方がやや多くの項目について言及している。

表 2 プログラムリーディングタスクの評価結果

説明項目	ベースライン [人]	提案ツール [人]
ledx.value	3	2
button.value	2	2
analog.value	3	3
time.sleep	0	0
変数宣言	3	3
入出力	3	2
ループ	1	0
条件分岐	3	2

5.3 考察

実験参加者数が少なく、初学者の実験開始前の能力に差があった可能性もあるため断言できないが、提案ツールを用いたほうがプログラムと関連づけて回路を設計することを効果的に学習できる可能性が示唆された。プログラムリーディングタスクは初学者全員にプログラミング経験があるため評価結果に差がないと予想したが、提案ツールを用いた実験参加者の方がややパフォーマンスが低かった。その要因としてプログラミングに熟達した学習者は簡潔な説明をすることがあるため、言及したと判定される項目数が少なくなったことが考えられる [13]。

6. 結論

本研究では遠隔の初学者と経験者が共同で電子工作に取り組み、電子工作を効果的に学ぶための製作ツールとして、カメラ映像の拡大や移動機能と同時操作機能をもち全てのツールを常時一覧可能なツールを提案した。評価実験では提案ツールと既存のツールを組み合わせ利用した場合を比較した。その結果、提案ツールを使った初学者の方が回路デザインタスクで高いパフォーマンスを示した。今後は実験を通して参加者から得たフィードバックを取り入れ、あらためてツールの効果を検証していきたい。

謝辞 本研究は東京大学情報学環中山未来ファクトリーからの支援を受けた。

参考文献

- [1] Halverson, E. and Peppler, K.: The Maker Movement and Learning, *International Handbook of the Learning Sciences* (Fischer, F., Hmelo-Silver, C. E., Goldman, S. R. and Reimann, P., eds.), Routledge, New York, NY, chapter 28, pp. 285–294 (online), DOI: 10.4324/9781315617572-28 (2018).
- [2] DesPortes, K. and DiSalvo, B.: Trials and Tribulations of Novices Working with the Arduino, *Proceedings of the 2019 ACM Conference on International Computing Education Research*, New York, NY, USA, ACM, pp. 219–227 (online), DOI: 10.1145/3291279.3339427 (2019).
- [3] McGrath, W., Drew, D., Warner, J., Kazemitabaar, M., Karchemsky, M., Mellis, D. and Hartmann, B.: Bifröst: Visualizing and Checking Behavior of Embedded Systems across Hardware and Software, *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Soft-*

- ware and Technology*, New York, NY, USA, ACM, pp. 299–310 (online), DOI: 10.1145/3126594.3126658 (2017).
- [4] Karchemsky, M., Zamfirescu-Pereira, J., Wu, K.-J., Guimbretière, F. and Hartmann, B.: Heimdall: A Remotely Controlled Inspection Workbench For Debugging Microcontroller Projects, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, pp. 1–12 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300728 (2019).
- [5] Chen, Y., Jones, J. and Yao, Y.: WireOn: Supporting Remote Collaboration for Embedded System Development, *Companion Publication of the 2020 Conference on Computer Supported Cooperative Work and Social Computing*, New York, NY, USA, ACM, pp. 7–11 (online), DOI: 10.1145/3406865.3418564 (2020).
- [6] Mellis, D. A., Buechley, L., Resnick, M. and Hartmann, B.: Engaging Amateurs in the Design, Fabrication, and Assembly of Electronic Devices, *Proceedings of the 2016 ACM Conference on Designing Interactive Systems*, New York, NY, USA, ACM, pp. 1270–1281 (online), DOI: 10.1145/2901790.2901833 (2016).
- [7] Villanueva, A. M., Zhu, Z., Liu, Z., Du, X., Huang, J., Peppler, K. and Ramani, K.: RobotAR: An Augmented Reality Compatible Teleconsulting Robotics Toolkit for Augmented Makerspace Experiences, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, ACM, pp. 1–13 (online), DOI: 10.1145/3411764.3445726 (2021).
- [8] Rice, M., Ma, K.-T., Tay, H. H., Kaliappan, J., Koh, W. L., Tan, W. P. and Ng, J.: Evaluating an augmented remote assistance platform to support industrial applications, *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, IEEE, pp. 592–597 (online), DOI: 10.1109/WF-IoT.2018.8355133 (2018).
- [9] Bryant, T. and Schneider, B.: How Real-Time Shared Gaze Visualizations Can Benefit Peer Teaching : A Qualitative Study, *Proceedings of the 14th International Conference on Computer-Supported Collaborative Learning - CSCL 2021*, International Society of the Learning Sciences, pp. 83–90 (online), DOI: 10.22318/cscl2021.83 (2021).
- [10] Radu, I., Joy, T. and Schneider, B.: Virtual Makerspaces: Merging AR/VR/MR to Enable Remote Collaborations in Physical Maker Activities, *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, ACM, pp. 1–5 (online), DOI: 10.1145/3411763.3451561 (2021).
- [11] ITP Physical Computing: Physical Computing Remote Learning Tools, <https://itp.nyu.edu/physcomp/physical-computing-remote-learning-tools/>. 参照日: 2021-12-17.
- [12] Jayathirtha, G., Fields, D. and Kafai, Y.: Pair Debugging of Electronic Textiles Projects: Analyzing Think-Aloud Protocols for High School Students’ Strategies and Practices While Problem Solving, *The Interdisciplinarity of the Learning Sciences, 14th International Conference of the Learning Sciences (ICLS) 2020* (Gresalfi, M. and Horn, I. S., eds.), International Society of the Learning Sciences, pp. 1047–1054 (オンライン), DOI: 10.22318/icls2020.1047 (2020).
- [13] Litts, B. K., Kafai, Y. B., Lui, D. A., Walker, J. T. and Widman, S. A.: Stitching Codeable Circuits: High School Students’ Learning About Circuitry and Coding with Electronic Textiles, *Journal of Science Education and Technology*, Vol. 26, No. 5, pp. 494–507 (オンライン), DOI: 10.1007/s10956-017-9694-0 (2017).