

# プロジェクションマッピングによる電子工作体験支援

秋山 耀<sup>\*1</sup> 宮下 芳明<sup>\*2\*3</sup>

## Electronic Modeling Experience Support System Using Projection Mapping

Yoh Akiyama<sup>\*1</sup> and Homei Miyashita<sup>\*2\*3</sup>

**Abstract** – Digital fabrication and physical computing have become widespread, and the field of electronics has recently attracted the general public, requiring a novice user to understand specifications of parts. A user is often demotivated when learning with specification sheets and without real experience. In this thesis, we present a system to achieve both, a sense of reality and high-speed learning through trial and error. Our system uses lighting with projection mapping, even over 3D printed mock-ups, to create a software simulator with a high sense of reality, thereby motivating users to learn. This paper describes the configuration of the system and presents user feedback received from the demonstration of the system.

**Keywords** : projection mapping, electronics, pseudo lighting, experience of electricity

### 1 はじめに

デジタルファブリケーションとフィジカルコンピューティングの普及により、自分で作りたいものを設計し加工、といった流れをユーザが気軽にできるようになってきた。これにより、今までもものづくりをしたことがない初心者もものづくりを行えるようになってきた。そのためものづくり初心者でも簡単に使えるようなファブリケーション体験環境が必要とされている。電子工作を行う際、素子の各ピンの役割など仕様について理解する必要がある。初学者にとってこのような仕様を仕様書から読み取ることは電子工作の障壁となる。



図1 提案手法による素子の擬似動作  
Fig.1 Pseudo operation with our method

実際の電子工作での試行錯誤によって素子の仕様を理解することも可能であるが、配線を誤ると素子の破

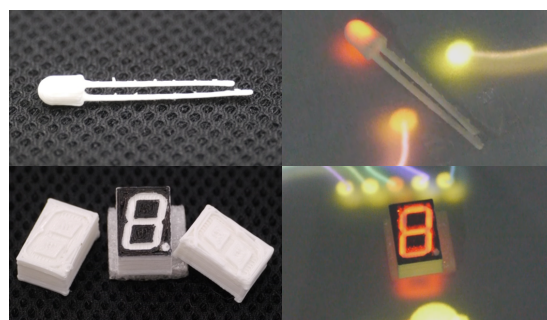


図2 3Dプリンタで出力したモックアップへのプロジェクション  
Fig.2 Projection over 3D printed mock-ups

損に繋がる恐れがある。また、接触不良や素子の初期不良など、配線ミス以外の理由で回路が動作しないこともあるので、問題箇所が特定しづらい。これらの問題回避のため、シミュレータによって回路をソフトウェア上で再現し、試行錯誤を行うこともできるが、現実世界の素子の駆動と比較し実感に乖離がある。

そこで本論文では、プロジェクションマッピング (PM) を用いて現実世界上とシミュレータ上の電子工作の間を埋めるシステムを作成し、試行錯誤と現実感を両立させる (図1)。また、システムで3Dプリントしたモックアップを擬似発光させることも可能である (図2)。本論文の目的は、試行錯誤と現実感の両立、素子という微小部分にPMをした際の現実感の検証、仮想的な配線で「配線をした」という実感をもたらせるかの検証である。以降、これらのコンセプト、システム、及び評価として行ったワークショップについて述べる。

<sup>\*1</sup>明治大学理工学部情報科学科

<sup>\*2</sup>明治大学

<sup>\*3</sup>独立行政法人科学技術振興機構 CREST

<sup>\*1</sup>Department of Computer Science, Meiji University

<sup>\*2</sup>Meiji University

<sup>\*3</sup>JST, CREST

## 2 参考文献

AR は目の前にある実物体とそれが持つ特性や情報を同時に同じ場所に提示できることから理解を深められる [1, 2]. 提案システムでも実物の電子部品があたかも動作しているように見えることで理解が深まると考えられる.

これまで様々な電子工作支援環境が提案されてきた. 落合の Visible Breadboard[3] は回路に流れている電気をリアルタイムで AR 的に可視化し, 新たな発見と感動を共有し電気回路を触ることの喜びを与えることを目的としている. 本論文も現実感の拡張による電子工作学習支援のモチベーション向上を目的としている. また, ソフトウェアを用いて電子工作学習支援する研究には Fritzing[4] や CCK[5] が存在する. Fritzing はソフトウェア上にブレッドボードを使用した回路を作成し, シミュレーションすることができる. CCK はブレッドボード上ではなく, 自由に回路を作成して試行錯誤できるツールである. さらに, Conradi らは電子工作の作業環境を拡張し, 電子工作をテーブルトップインタフェースで行う Flow of Electrons[6] を提案した. Conradi らは, 初学者を支援するツールキットは必要不可欠な存在であり, 初学者のために拡張された作業環境を用意すべきだと述べている. しかし, Flow of Electrons を含め, シミュレータでは「現実の素子が動くという楽しさ」という実感を与えられない.

## 3 提案システム

提案システムは, PM を用いて現実感を保ちながらソフトウェア上で電子工作体験を支援するシステムである. 水平に置いたタッチパネルディスプレイ上を作業面とする. 作業面を指でなぞって線を引き, 引いた線を導線として使用する. そして PM により, 実部品が駆動しているように見せる. 提案システムは, 「素子を動作させる」という「目的」の部分は現実世界で行い, 「ジャンパ線をつなぐ」という「手段」の部分を現実世界の制約を受けないソフトウェア上で行うことを実現する. これにより, 初学者の負担を減らし, 高速に試行錯誤を行え, かつ現実感を両立した電子工作体験が可能になる.

### 3.1 システム構成

システムの外観は図 3 のようになっている. タッチパネル対応ディスプレイを水平にし, その上方にプロジェクタを設置している. その際, プロジェクタの投影範囲がちょうどディスプレイと一致する位置にプロジェクタを固定している. タッチ位置とプロジェクタの投影位置を合わせるためにプロジェクタをディスプレイとミラーリングしている. また, ディスプレイの全体が映る位置に web カメラを設置している. 提案

システムは上方からの PM と, 下方でのタッチパネルディスプレイの表示が重なる. そのため, ディスプレイ上にトレーシングペーパーを敷き, プロジェクタからの反射光とディスプレイからの透過光のバランスを取った. これにより, プロジェクタからの投影が手によって遮られ作業面に映らない状態でも, ディスプレイからの透過光によって配線状況の表示を続けることができる. なお, トレーシングペーパーの厚さは約 0.058mm であり, タッチ入力には影響ない.

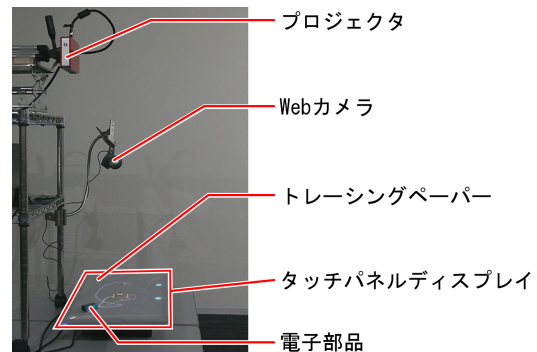


図 3 システム外観  
Fig. 3 Appearance of system

素子の位置はカメラでトラッキングしていない. ユーザは用意された素子画像一覧から, 使用する素子画像を設置したい位置にドラッグアンドドロップする. そして, 設置した素子画像の上に実物の素子をユーザが設置する. 素子の画像は設置時のみ表示しておき, 試行錯誤時には隠す. そして, ユーザは仮想的なジャンパ線をドラッグ操作することで結線・断線を行う.

試行錯誤を支援するために, 配線の undo・redo, 回路の保存と読み込み機能を実装している. undo で配線を取り消す場合は断線ジェスチャを行った際と挙動が同じになるが, ユーザによって断線と undo の使い分けが発生した. これは 3 章を参照されたい. 各動作をユーザが行った際には動作に応じた効果音を鳴らし, システムの使用に気持ち良さを持たせる工夫を行った.

現在対応している素子は, 7セグ LED・マトリクス LED・フルカラー LED・豆電球の発光素子, ブザー, バイブレータ, そしてスイッチ・可変抵抗の入力素子である. 提案システムは Circuit Simulator Applet[7] と連携して回路シミュレーションを行うことができるがバグが有るため, 深さ優先探索により閉路判定のみを行うシミュレータを内蔵している.

### 3.2 結線と断線

ユーザは試行錯誤を本物の導線ではなく, 仮想的なジャンパ線を用いて行う. 素子の端子は, 半径 10pixel, 実測 2mm の円を素子の周囲に表示することで表現した. 始点が素子の端子であるドラッグ操作を結線と認

識している。それ以外のドラッグ操作はすべて断線ジェスチャとして認識する。ジャンパ線は配線ごとに異なる色で描画し、断線ジェスチャ中に描画される線（消去線と呼ぶ）はすべて緑で統一した。消去線を描画するピクセルの色が黒（背景色）または緑（消去線）以外であった時、同じ色の配線を消去対象にする。ドラッグが終了した時に消去対象の配線をすべて削除する。

また、タッチパネルにおける指の当たり判定の大きさを考え、端子に対して 30pixel、実測 6mm より近い位置をタッチすると、端子の円の半径が 30pixel に拡大するようにした。30pixel より近い端子が複数存在する場合は、タッチ地点に一番近い端子のみ拡大することで、端子の選択をわかりやすくした。これにより例えばマトリクス LED など、端子が密集している素子でも配線時の精度を高めることに成功した。

### 3.3 上部からの PM による擬似動作

素子の動作状況の提示はすべて PM によって行う。素子によって擬似動作させるために適した投影内容が変わるため、素子によって投影内容を変更している。

【LED・マトリクス LED・7セグ LED】これらの素子は、グラデーションを行わない単色で、素子の発光部分におおよそ一致するような投影で現実感のある発光を再現できた。これは投影した映像が素子の発光部分で拡散し、自然な形になるためと考えられる。

【豆電球】単色での PM だけでは現実感のある発光を再現できなかった素子も存在する。豆電球の場合は、擬似点灯させる部分の周りにパーティクル表現を表示することで、単色の投影より現実感のある発光に成功している。LED の場合のように、おおよその位置に PM するだけでは現実感のある発光を再現できなかった。これは発光部分が他の素子に比べ比較的大きく、透過性のある素材でできているため、投影した映像が作業面に抜けてしまうからだと考えられる。

【ブザー、バイブレータ】駆動時に発光しない素子もシステムによって現実感のある擬似動作をさせることが可能である。ブザーなどは、素子駆動時の音を録音したものを PC から鳴らすことにより駆動を表現した。加えてバイブレータの場合は振動アニメーションを素子の周囲に表示し、更に現実感を持たせている。

【素子が壊れるアニメーション】短絡が発生した場合、素子が壊れるアニメーションを表示することで配線ミスが発生したことをユーザに知らせる。これにより初学者でも「回路上でやってはいけないこと」を簡単に理解できる。

【3D プリンタによるモックアップ】3D プリンタでは実部品を出力することはできないが、素子の形を真似たモックアップを出力することは可能である。システムにより、3D プリンタで出力したモックアップも

同様の擬似発光が可能だとわかった。これにより手元に素子がない場合でも、好きなときに好きな素子を現実感を持って動かすことができる（図 2）。

### 3.4 入力システム

ユーザからの入力はタッチパネルとカメラの 2 種類を用いる。前者はタッチジェスチャなどのディスプレイに直接触れる操作に用いる。後者はスイッチや可変抵抗の状態把握など、タッチパネルに指を付けないオーバーな操作の認識に使用する。hsv 表色系を用いた肌色認識を行うことで、ユーザの指をカメラで認識し、素子上に指が重なったら実部品への入力がされたと認識する。カメラと作業面のキャリブレーションを行うため AR マーカを使用した。

## 4 考察

第 21 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 (WISS2013) において、90 分間デモ会場にて参加者 180 人程度に提案システムを体験させた [8]。提案システムによる擬似発光を本当に電気が通って発光していると錯覚する体験者や、ブザーやバイブレータ本体から音が出ていると錯覚した体験者が多くみられた。これにより、PM による擬似動作が現実感のある駆動だったとわかった。体験者は配線方法を簡単に説明するだけで操作を行っていたことから、システムの配線方法は自然でわかりやすいものだったと考える。体験者から短絡などの回路状況も提示すべきという意見があったため、改良を施し、456 人が参加した 27th Symposium on User Interface Software and Technology (UIST2014) において、4 時間デモ会場にて参加者に提案システムを体験させた [9]。モックアップを本物の素子だと勘違いする体験者がいたため、3D プリンタで出力したモックアップでも現実感を提供できることがわかった。体験者は素子の破損アニメーションが流れた際に、回路に短絡が起きたことをすぐに理解し、配線を変更している様子が見受けられた。これにより、PM による回路状況提示は回路理解に役立ったと考える。そのほかに、「配線が気持ちいい」「提案システムを使用することで楽しく素子の仕様理解ができそうだ」「回路の配線状況がわかりやすく、楽しんで回路を作ることができた」などの好評な意見も頂いた。どちらのデモ発表でも、システムを触りたがる参加者が多く、電子工作のモチベーション向上につながると考えている。

また、システムを使用する際に、部品の端子を拡張した体験者が見受けられた（図 4）。ある体験者は端子を自分のわかりやすい位置に再配置することで素子への配線を簡単にしていた。また 7セグ LED を使用した回路では、数字を表示するのに必要な配線を端子

としてまとめておき、プログラミングにおける関数を作成した体験者もいた。このように、ジャンパ線を自由な位置に配線できることで、自分がわかりやすい自分だけの配線が出来るようになったと考えられる。

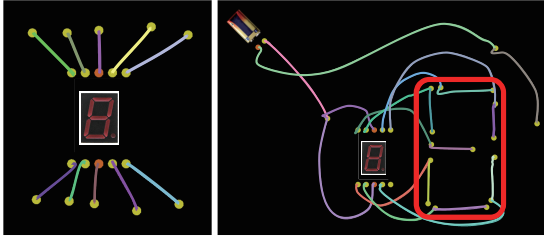


図4 スペースを利用した配線の工夫  
Fig.4 Adjustments to wiring using space

undo・redo機能については、多用した体験者とはほとんど使用しなかった体験者に分かれた。多用した体験者は、動作のやり直しはすべてundoボタンを使用していた。ほとんど使用しなかった体験者は、ドラッグ操作によって同様の操作を再現していた。しかし、配線の短い部分や難しい部分の断線については、undoボタンを使用していた。これにより、undoボタンやredoボタンは配線の簡易化に役立ったと考える。

## 5 結論と展望

本論文ではデジタルファブリケーションとフィジカルコンピューティングの普及に伴い、個人によるものづくり、特に初学者のものづくりを支援する必要性に着目し、AR技術を用いた電子工作体験システムを提案した。PMにより素子の現実感を保った擬似動作に成功し、デモ発表にて実際の駆動と錯覚する程度の現実感を確認した。実部品でない3Dプリンタで出力したモックアップも同様の擬似動作に成功した。また、タッチジェスチャによって直感的な配線・断線動作の再現に成功した。これにより、実際の素子が稼働しているという現実感と、ソフトウェアシミュレータの高速さを兼ねることに成功した。本論文ではデモ発表で見受けられた配線工夫の事例を述べ、ユーザのundo・redo機能の使用法と有用性について考察した。

この技術の発展により、実物体の形と機能を分離し、形を3Dプリンタで、機能をPMで擬似的に与えるという未来が見て取れる。現在は実部品への投影だが、これからは本当の実物体である必要はなく、アップロードされているモデルや3Dスキャンしたデータを使用して機能を与え実部品として使用できると考える。

## 参考文献

- [1] 藤本雄一郎, 山本豪志朗, 武富貴史他. 拡張現実感における情報提示の特性とユーザの記憶効率の関連性.

日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.18, No.1, pp.81-91, 2013.

- [2] Mannus, F., Rubel, J., Wagner, C. et al. Augmenting magnetic field lines for school experiments. In *Proc. of ISMAR '11*, pp.263-264, 2011.
- [3] 落合陽一. 「電気がみえる」デバイス VisibleBreadboard. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.15, No.3, pp.463-466, 2010.
- [4] Knrig, A., Wettach, R., and Cohen, J. Fritzing: a tool for advancing electronic prototyping for designers. In *Proc. of TEI '09*, pp.351-358, 2009.
- [5] Wieman, C.E. and Perkins, K. K. A powerful tool for teaching science. *Nature Physics*, 2, 5, pp.290-292, 2006.
- [6] Conradi, B., Lerch, V., Hommer, M. et al. Flow of Electrons: An Augmented Workspace for Learning Physical Computing Experientially. In *Proc. of ITS '11*, pp.182-191, 2011.
- [7] Circuit Simulator Applet  
<http://www.falstad.com/circuit/>
- [8] 秋山耀, 宮下芳明. 部品へのプロジェクションマッピングによる通電しない電子工作. 第21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論文集, pp.141-142, 2013.
- [9] Akiyama, Y., and Miyashita, H. Projectron Mapping: The Exercise and Extension of Augmented Workspaces for Learning Electronic Modeling through Projection Mapping. In *Proc. of UIST '14 Adjunct*, pp.57-58, 2014.

## A 付録

### A.1 動画 URL

<https://www.youtube.com/watch?v=N3dJ4XRDF1I>  
(2014年12月13日)

(2014年12月15日受付)

### [著者紹介]

#### 秋山 耀



現在, 明治大学理工学部情報科学科在学中(3年)。WISS2013対話発表賞受賞。AR, タンジブルインタフェース, ファブリケーション技術に興味を持つ。<https://sites.google.com/site/gutugutu30>

#### 宮下 芳明



(正会員)  
千葉大学工学部卒業(画像工学), 富山大学大学院で音楽教育を専攻, 北陸先端科学技術大学院大学にて博士号(知識科学)取得, 優秀修了者賞。2007年度より明治大学理工学部に着任。2009年度より准教授。2013年より同大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科所属。2014年より教授, 現在に至る。VR学会, ヒューマンインターフェース学会, 日本ソフトウェア科学会, 情報処理学会, ACM各会員。