

電子工作によるものづくり授業のための
実配線体験が可能な回路シミュレータの開発

Development of a Circuit Simulator Enabling Practical Wiring Experience
for Electronics-Based Maker Classes

太田正哉[†]
Masaya Ohta

栗木珠美[‡]
Jumi Kuriki

1. はじめに

近年学校教育では、情報通信技術に関する教育の重要性が一段と増しており、高等学校では2022年度から共通必修科目「情報I」もスタートした。情報Iで取り上げられている「論理回路」はこれまでも工業高校等で授業されており、学習を効果的に行うためのツールやシステムが、多数提案されている。これらは主に実回路による方法、回路シミュレータによる方法に大別される。

実回路による方法は実際の配線を体験させることができ、実物に触れることによる学習効果が非常に高いが、回路が正しく作成されたかを確認する簡易な方法がなく、教師一人では授業時間内にチェックできる数は限られるため、大人数の普通科高校での授業で実施することは難しい。また、例えば標準ロジックICを使用する場合、論理回路の回路図上に表示されない電源端子の配線を要するなど、電気回路の知識が必要とされ、論理回路の学習だけに注力できない。さらに短絡など誤配線による回路の破損や火傷等の危険があり、加えて、さまざまな回路を作成させるには、対応する論理素子を用意する必要がある。

一方、回路シミュレータによる方法は、上述のような課題の大半は解消されるが、回路の配線をディスプレイ上で行うため、実物に触れる体験的な学習ができない。また、作成した回路の正誤のチェックは課題として残る。さらに通常回路シミュレータによる実験は一人の生徒だけが操作することになり、複数人で分担作業するようなグループ学習（グループ実験）が難しい。

そこで本研究では、実際に実体のある回路を配線して目的の回路を作成することが可能な論理回路シミュレータを開発する（以下論理回路作成実験システムと呼ぶ）。本システムより実回路および回路シミュレータの両者の欠点を緩和することができる。本手法の特徴は以下の通りである。

- ・本システムでは、シミュレーション対象の回路を実際の素子を模した仮想論理素子（Virtual Logic Element）を実際に配線して回路を作成するため、実物による体験的な学習が可能である。
- ・本システムは論理回路の回路図上に描かれる線（論理値が通過する信号線）を配線するだけで済むため、授業時に電気回路に関する説明が最小限で済み、論理回路の学習だけに注力できる。
- ・本システムは本質的に回路シミュレータであるため、短絡などの誤配線をして回路の破損や火傷等の危険がない。

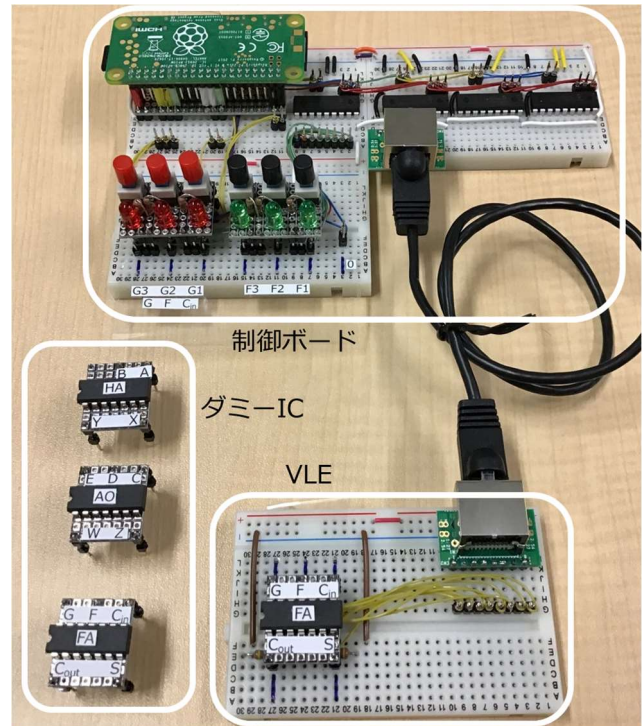
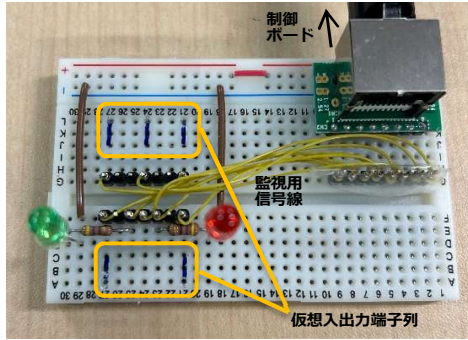


図1 論理回路作成実験システム

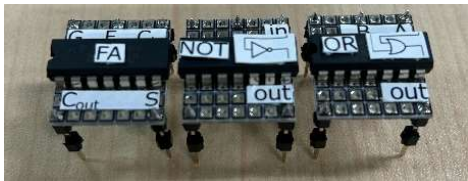
- ・本システムは内蔵のマイコンによりリアルタイムに配線状況を監視し、回路シミュレーションの実行により各端子のHIGH/LOWを計算し、LEDの明暗で表示するため、生徒には実際に目の前の回路でその現象が現れているように感じることができる。
- ・リアルタイムに配線状況を監視できるため、目的の回路が作成できているか否かを検出することが可能であり、作成中の生徒に誤配線を提示することができる。
- ・本システムのマイコンはネットワークに接続できるため、配線状況や回路の正誤をリアルタイムに教師のPCに送信し、提示することが可能であり、大人数の実験授業でも少ない教師で対応できる。
- ・本システムは実際の回路作成実験と同じ形態の授業ができ、複数人の生徒が協力しあって実験するグループ学習

[†] 大阪公立大学 Osaka Metropolitan University

[‡] 大阪府立大学 Osaka Prefecture University



(a) ベースボード

(b)ダミーIC
図 2 VLE

が可能である。回路シミュレータによる実験のように操作する生徒 1 人だけが手を動かし、他は見るだけのような状況を避けられる。

以下では本システムの詳細について説明する。また、実際に本システムを試作し、高校生を対象とした論理回路の実験授業を行なった結果を説明する。

2. 論理回路作成実験システム

2.1 概要

まず試作したシステムを図 1 に示す。上は制御ボード、右下は論理素子の役割を担う仮想論理素子 (VLE)、左下は VLE に挿すダミーIC である。本システムを使用するには、これらの他に PC (またはタブレット) および Wi-Fi 環境が必要である。

2.2 仮想論理素子 VLE

図 2 に VLE の詳細を示す。(a)は VLE のベースとなるブレッドボード、(b)はベースから取り外したダミーIC である。ダミーIC には 5 本の足があり、生徒らが使用する際はベースの左エリアの青線の列に挿しておく。「足は IC の端子につながっているのだから、青線の列を IC の入出力端子だと考えればよい」と生徒らには説明する (実際には IC と足はつながっていない。詳細は後述する)。これらの列を仮想入出力端子列と呼ぶ。生徒らはこの列にジャンパー線を挿して他の VLE と接続し、目的の回路を作成する。

仮想入出力端子列には制御ボードからの信号線がベースの右エリアのコネクタ経由で接続されており、これにより各列に挿されるジャンパー線がどの VLE のどの仮想入出力端子列に挿されたかリアルタイムに監視する (詳細は後述する)。

前述のように IC と足はつながっておらず電気的には不要であるが、学習者にその VLE の素子名 (NOT, OR, XOR, HA, FA 等) と、それぞれの足の役割 (入力であるか出

力であるか) を視覚的に理解するためのラベルの効用がある。またダミーIC を差し替えることで学習者は異なる素子を使用することを自然に認識できる。実際には差し替えと同時にマイコン内の当該 VLE の役割 (論理演算) をソフトウェア的に切り替えることで、VLE の論理演算を切り替える。

ベース上には 2 つの LED があり、制御ボードと右エリアのコネクタ経由で接続されており、点灯・消灯が外部から制御される。本試作では VLE の出力の論理値に応じて点灯または消灯するようしており、生徒らが視覚的に出力の論理値を確認できるようにしている。

2.3 制御ボード

図 3 は制御ボードの構造を示す概略図である。制御ボードには図 4 のようなスイッチがついており、この ON/OFF により対応する端子の論理値を 0 または 1 にできる。よってこの端子と VLE の仮想入出力端子列をジャンパー線で接続することで、論理回路に論理値を供給できる。この端子のある列を論理値のソース端子列と呼ぶ。

制御ボードにはマイコン (Raspberry Pi zero) が搭載されており、その GPIO port は VLE の仮想入出力端子列およびスイッチ部のソース端子列と接続され、後述の方法で端子列間のジャンパー線の有無を監視する。また GPIO は VLE やスイッチ部の LED と接続されており、その点灯・消灯を制御する。本試作では 3 台の VLE、6 個のスイッチを実装しており、監視対象の端子列数は 28、LED は 12 個で、マイコンの GPIO だけでは足りないため、I/O エキスパンダ (8bit SPI MCP23S08) で補っている。

生徒らの挿すジャンパー線を監視する方法は以下の通りである。マイコンの GPIO port および I/O エキスパンダの I/O port はソフトウェアにより適宜 input と output を切り替えられる。この機能を利用して導通テストの要領で生徒の接続したジャンパー線を監視する。まず監視対象の 28 port を pull down しておき input に設定する。この状態である時刻で n 番 port のみを output に設定して HIGH を出力する。このときこの port の先にある端子列と別の端子列がジャンパー線で短絡されていると、その接続先 port に HIGH が伝搬するため、これを検知することで端子列間がジャンパーされているか検出できる。HIGH にする port を周期的に切り替えることで全 port 間の短絡チェックが可能となり、生徒らの作成している回路をリアルタイムに検出できる。

マイコンは検出した回路 (ネットリスト) を元に回路の正誤を確認する (詳細は後述)。また論理回路シミュレーションを行い、回路各所の論理値を計算し、各 VLE の LED の点灯・消灯を制御する。

2.4 配線の正誤チェック～配線ガイド～

通常の回路シミュレータはユーザが与えた回路のシミュレーションを行うのみであるが、本システムは目標となる論理回路が作成されているか否かをリアルタイムにチェックする機能を有する。本機能は事前に目標となる回路を登録しておき、生徒が配線を始めると、配線したジャンパー線が目標回路内にはない場合それを生徒に表示する。具体的には配線チェックの結果をマイコン内の Web サーバ配下に保存し、別途用意した PC のブラウザでこの Web サーバに

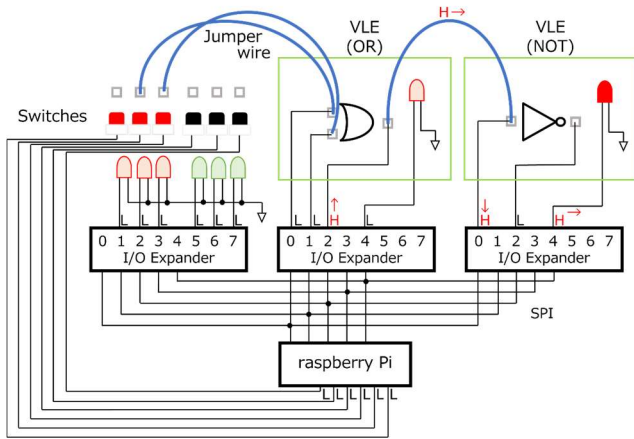


図 3 制御ボードの概略

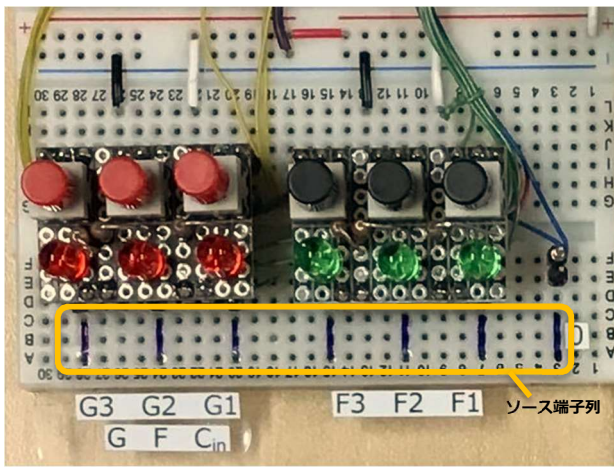


図 4 制御ボードのスイッチ

アクセスし、結果データを読み込み画面に表示する。この表示を配線ガイドと呼ぶ。

図 5 は試作した配線ガイドの表示例である。事前登録された回路の配線は黒で表示され、これを生徒がジャンパー線で配線すると黄色に変わる。誤配線すると画面に誤りであることが表示される。生徒はジャンパー線を 1 本挿す毎にガイド画面を確認し、自分が意図した配線ができていないか確認することが可能で、円滑に回路作成を進めることができる。

3. 実験と評価

提案するシステムを評価するための実験を行った。評価実験では比較対象として、論理回路の演習用プリント、および通常の論理回路シミュレータを用意し、高校生 23 名を被験者として以下の模擬授業を行った。

3.1 模擬授業の方法

模擬授業ではまず各自にプリントと PC を配布した。提案する論理回路作成実験システムは 2 人 (1 班) に 1 つとした。最初に論理回路および 2 進数について解説し、その後プリントで図 6 の全ての論理回路の真理値表を作成する問題をさせた。次に PC 上の論理回路シミュレータで各自図 6 (b) の論理回路を作成させ、プリントの答え合わせをさ

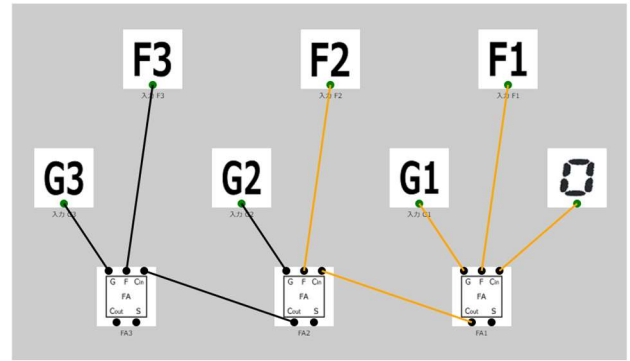


図 5 配線ガイドの表示例

せた。最後に図 6(a),(d)の回路を各班毎に提案システムで作成させ、プリントの答え合わせをさせた。(d)の 3bit 加算器を作成する際は、3 班 6 人で 1 つの回路を分担して作成させ、動作を確認させた。最後にアンケートを行い、それぞれの実験について質問した。

3.2 結果と考察

アンケートでは最初に好きな科目を問い、生徒を理系型 10 人、文系型 5 人、中間 (文理型) 8 人に分類した。次にプリントのみの時、プリントと論理回路シミュレータによる実験 (プリント+シミュレータ)、プリントと論理回路作成実験システム (プリント+実回路) による実験について、論理回路の理解にどの程度効果的かを聞いた。回答は 5 段階で 5 を最も高い評価とした。

図 7 は回答の平均である。図より文理の区別はほとんどなく、いずれの型の生徒もプリントのみよりプリント+シミュレータや、プリント+実回路の方が論理回路の理解度が高くなると感じており、またシミュレータより実回路 (提案する論理回路作成実験システム) の方がより高いスコアとなった。

図 8 はシミュレータか実回路のいずれが論理回路の理解に効果があるかを直接質問した結果である。図よりいずれの型の生徒も実回路の支持が多かった。提案システムの内部は回路シミュレータであるが、目の前にあるシステムが回路シミュレータであることは生徒にはわからない。実際に触れて実験していると感じることで、このような結果となったと推察される。

図 9 は配線ガイドの有効性を質問した結果である。図より配線ガイドが役立っていることがわかる。

その他聞き取り調査より、開発したシステムは自分の手で実際に配線を行うため、LED が光った時の達成感があり、理解度や興味が深まったという意見が多数あった。以上より提案システムが論理回路の学習に有効であると考えられる。

4. 関連研究

文献[1], [2], [3]は Web ブラウザ上で論理回路シミュレーションを行うツールである。直感的な操作で回路を作成することができるが、目標とする回路を作成させようとしたとき、生徒らの作成した回路が目標回路と一致しているかを確認する方法がない。

文献[4], [5]はブレッドボード上の電子回路とタブレット等の画面上の仮想部品をAR技術で融合して回路を作成するシステムである。実物の回路に触れられることから実体験を伴う学習が可能であるが、これらは個人の学習用ツールで、学校での授業を想定したものではない。また前述と同様、目標の回路と作成した回路の一致を確認する方法がない。

本研究室では物理的な配線が可能で、かつソフトウェアの書き換えにより様々なパーツに変身できるシステム(スマートパーツ, SP)を開発している[6][7]。文献[6]では電球, 抵抗, 電池, 電圧計等に変身するSPを開発し, 小中学校の電気実験向けのシステムを提案している。文献[7]はデジタルICとLEDの簡単なブレッドボード回路を学習するためのシステムを提案している。ただし, いずれも論理回路学習に特化したシステムではない。

5. おわりに

本研究では, 実際に実体のある回路を配線して目的の回路を作成することが可能な論理回路シミュレータを開発した。実際に本システムを試作し, これを高校生を対象とした模擬授業で評価した結果, 通常の回路シミュレータよりも論理回路の学習に有効であることを確認した。

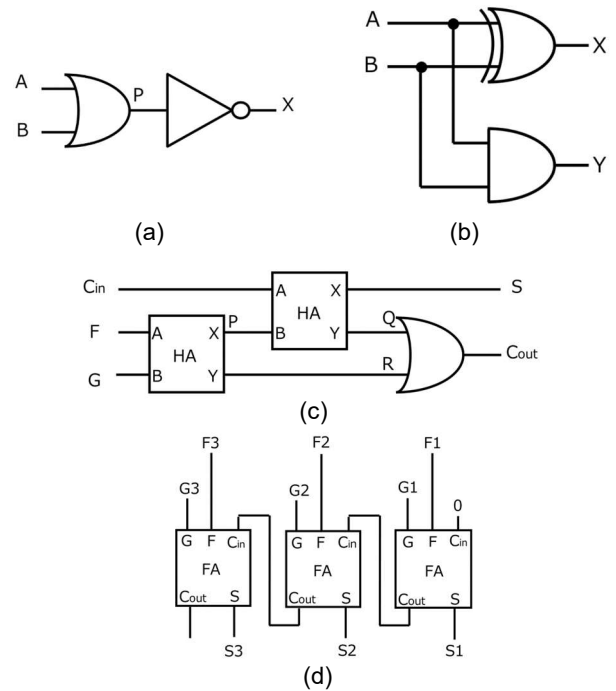


図6 演習用の論理回路

参考文献

- [1] Arase, K., SimcirJS (online): <https://github.com/kazuhikoarase/simcirjs/>.
- [2] C. Burch, "Logisim: A Graphical System for Logic Circuit Design and Simulation," Journal on Educational Resources in Computing, vol.2, no.1, pp.5-16, 2002.
- [3] 兼俊智也, 赤澤紀子, 中山泰一, "論理回路学習における初学者向けWBTシステム," 情報教育シンポジウム, pp.129-132, 2021.
- [4] Yoonji Kim, et. al., "A Mixed-Reality Tool for Designing and Tuning Breadboarded Circuits," Conf. of Human-Computer Interaction 2019, Glasgow, May 4-9, 2019.
- [5] Te-Yen Wu, et. al., "Automatic Sensing of Physical Circuits and Generation of Virtual Circuits to Support Software Tools," the 30th Annual ACM Symposium, Québec City, Oct. 22-25, 2017.
- [6] 仲里央奈, 太田正哉, "電気回路の実験授業を支援するスマートパーツの試作," 電気学会全国大会論文集, p.11 (2020).
- [7] 國廣美桜, 栗木珠美, 太田正哉, "電子工作によるものづくり授業を支援するARツールの開発," 情報処理学会関西支部大会, pp.1-7, 2021.

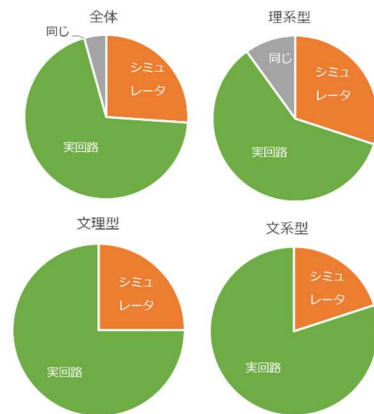


図7 シミュレータと実回路の比較

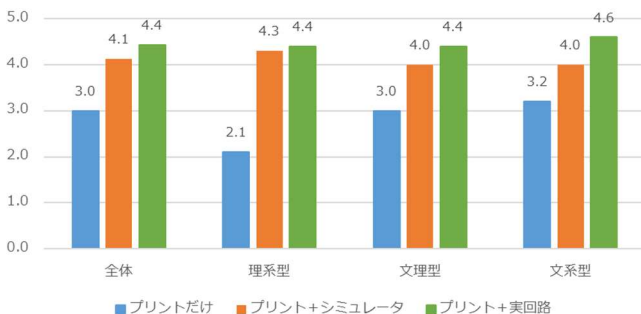


図7 論理回路の理解度

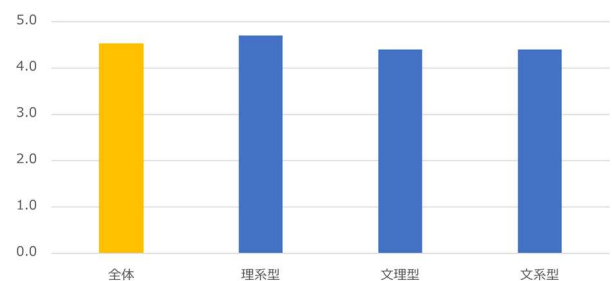


図9 配線ガイドの有用性