

D-06

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

A Development of an AR Tool Supporting Manufacturing Class on Electronics Laboratory

國廣 美桜¹ 栗木 珠美¹ 太田 正哉¹

Mio Kunihiro Jumi Kuriki Masaya Ohta

1. はじめに

小中高校の理科や物理における電気回路の実験授業において、教師や指導者は生徒が正しい回路を作成しているか、短絡などの危険な回路を作成していないか等に注意を払う必要がある。しかし大人数の授業の場合、生徒達の回路を常時チェックすることは不可能である。

本研究室ではこの課題を解決するため Smart Parts (SP) と呼ぶシステムを開発した[1,2]。本システムは仮想の回路を実在の導線で配線できるハードウェアで、回路は仮想であるため短絡しても危険はない。また生徒は通常の回路作成と同じように実在の配線を体験することができる。ただし、これまで試作した SP はシステムが複雑で、かつ回路の動作確認や測定結果の読み取りに手間がかかった。さらに従来の SP は小中学校の理科で学習するような電池や電球の回路のみを想定しており、近年情報教育の分野で注目されているブレッドボードによる電子工作に対応していない。

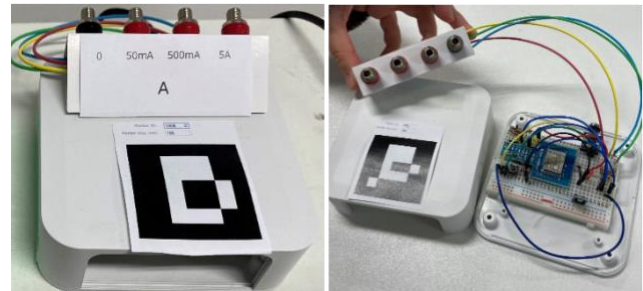
そこで本研究では従来の SP を以下のように改善する。仮想部品毎に必要なマイコンを集約し、システムを簡素化する。また回路の動作確認を容易にする方法を提案する。さらにブレッドボードを使った電子工作にも対応させ、特に初学者が慣れない複雑な回路の作成を補助する配線ガイド機能を提案する。実際にシステムを試作し、数名の被験者に対して実験を行い、その有効性について評価する。

2. Smart Parts (SP)

SP は、電池、電球、電圧計など任意の電源、回路部品、測定器の役割をソフトウェア的に割り当てられるハードウェアである。図 1 (a) に以前概念検証のために試作した SP の外観を示す。図のように SP は端子の付いた小型のケースで、端子数以外同一の構造である。通常の回路実験と同様に、単線（ワニ口クリップ付き導線等）で端子どうしを接続して回路を作成できる。各 SP には AR (Augmented Reality) マーカが貼付されており、タブレットをかざすことで図 2 のように電流計の指針面や点灯した電球の画像がマーカ上に重畳表示され、回路の動作確認や測定器の読み取りを行うことができる。

図 1 (b) に SP の内部を、図 3 に全体のシステム構成を示す。SP の内部には端子間の接続状況を定期的に監視し、その情報を外部のサーバに Wi-Fi で送信するマイコンが内蔵されている。サーバはその情報をタブレットに送信し、タブレットはこれを元に回路シミュレーションを行い、その結果画像を認識した AR マーカ上に重畳表示する。

通常の回路シミュレーションでは回路作成、シミュレーション、および結果表示を PC のみで行うが、SP では回路シミュレーションが回路を作成する生徒から隠蔽されてお



(a) 外観 (b) 内部構造

図 1 Smart Parts

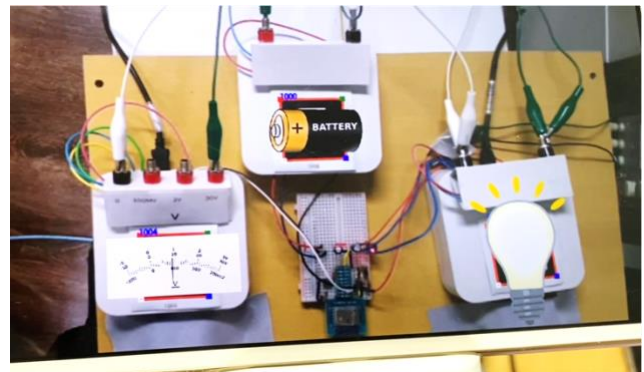


図 2 AR による実験結果の表示例

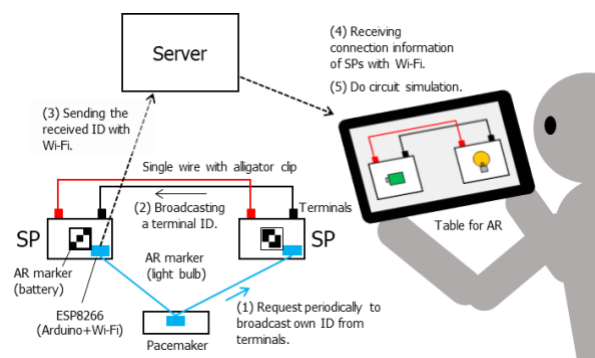


図 3 従来の SP のシステム構成

り、シミュレータの入力と出力である回路作成（配線）と結果表示は PC の外にある。すなわち SP は入出力インターフェースが実世界に引き出された回路シミュレータと考えられる。この SP により回路実験を安全に行うことができ、生徒は通常と同様の配線を体験できる。

SP は前述の通りソフトウェアの書き換えによりどのような部品・機器にもなり得る同一構造のハードウェア（端子数もソケットの差し替えにより可変）である。そのため、

¹ 大阪府立大学大学院人間社会システム科学研究科, Osaka Prefecture University.

ある SP が故障しても予備の SP のソフトウェアを書き換えることで交換可能で、実験中の部品や機器の故障に対応しやすい。また回路に必要な部品の数や種類が変わっても柔軟に対応でき、さまざまな実験が可能である。

3. Smart Parts の課題とその改善

3.1 Smart Parts の課題

従来の SP には以下の課題がある。前述の通り各 SP はそれぞれにマイコンを内蔵する必要がある、多数の回路部品を要する実験を行う場合、それだけマイコンの数も増え、実験機材一式のコストが部品数に比例して上昇する。また従来の SP では端子間の接続状況の監視のためにマイコン間で単線経由の 1 対多シリアル通信（調歩同期式・非同期）をしており、システムが複雑である。

さらに配線中や配線後に回路の動作（電球が光っているか否か、電圧計の指示はいくつか等）を確認するために、生徒は毎回 AR 用タブレットを手に持ちマーカ認識をしなければならない。特に配線中の単線がマーカ上を横切ると認識が不安定となるため、生徒は配線の所在をいつも気にしながら実験する必要がある。マーカ認識に手間取ると実験以外の要因で実験が滞ることになる。

これらに加えて、従来の SP は小中学校の理科実験で使用される電池、電球、電圧計・電流計等の実験用に試作されたもので、近年情報教育の分野で注目されているブレッドボードを用いた電子工作に対応していない。小学校におけるプログラミングの必修化や、子供向けプログラミング教室やロボット教室ではマイコンの応用回路がテーマとして頻りに挙げられている。また高校の教科「情報」では論理回路や真理値表が取り上げられることもあり、ブレッドボードでの実験に対応できることが望まれる。

3.2 システムの簡素化・単純化

図 4 に提案する SP のシステム構成を示す。新しい SP ではマイコンを 1 個とし、このマイコンと全 SP の全端子とを接続する形式に変更する。ただし通常のマイコンは GPIO (General-purpose input/output) の数が限られるため、I/O エクスパンダなどの IC を経由して全端子とマイコンを接続する。エクスパンダの I/O port はすべて pull down し、通常 LOW を検出できるように設定しておく。

マイコンは次のように各端子に繋がる I/O port を制御する。ある時刻で n 番 port のみを出力に設定して HIGH を出力し、他の port を入力に設定する。こうすると HIGH 信号は単線で接続されている端子を経由して I/O エクスパンダの各 port に帰還するため、この HIGH を検知すれば容易にどの端子どうしが接続しているか検出できる。

次の時刻では出力を $n+1$ 番 port のみとして同様の処理を行う。これを全 port について周期的に繰り返すことで、端子間の接続状況を常時監視できる。従来はこの HIGH の伝達に相当する機能を各マイコン間の 1 対多シリアル通信で実現しており、新しい SP ではシステムが大幅に簡素化される。本手法は SP が増えてもマイコンは増えずに I/O エクスパンダ IC が増えるだけのため、コストの上昇が抑えられる。

さらに、ここで使用するマイコンを Web サーバとすることで、従来は別に設置していたサーバが省略され、システムがより簡素化するだけでなく、マイコンが収集した端子

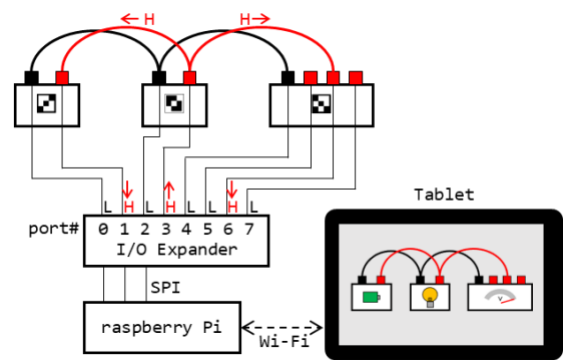


図 4 提案する Smart Parts の構成

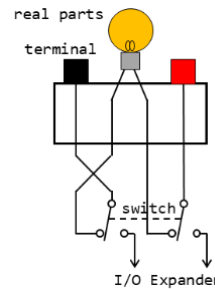


図 5 実部品と SP を切り替えるスイッチ

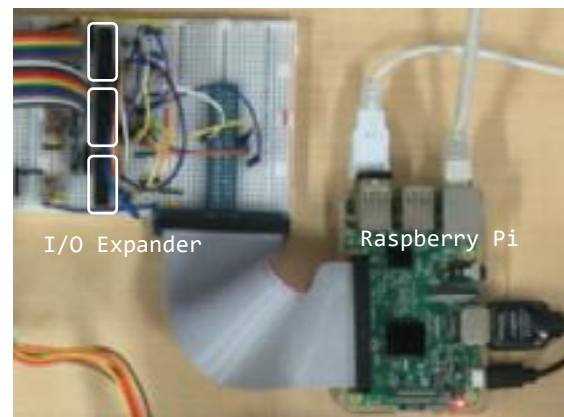


図 6 マイコンと I/O エクスパンダ

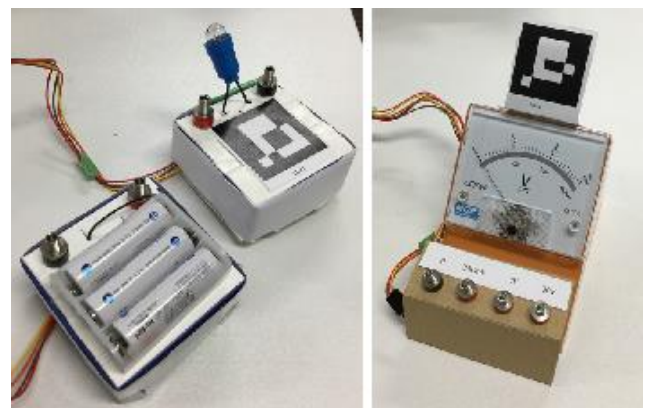


図 7 実部品との切替が可能な SP

間の接続情報をサーバにアップロードする Wi-Fi 通信も不要となる。

これに加えて図5のように各SPの端子付近に実部品（電池、電球等）を配置し、端子から I/O エキスパンダへの信号線を実部品に戻すスイッチを設けると、このスイッチの切替により実回路の実験も行えるようになる。例えば最初は SP を用いた仮想実験を行い、配線が正しいことを確認した後にスイッチを切り替えて実回路の実験に移る、といった使い方が考えられ、電源投入前に配線確認を行える安全な実験が可能となる。

以上を元にシステムを試作した。試作したシステムを図6および7に示す。マイコンには Raspberry Pi 3 Model B+, I/O エキスパンダとして 8bit SPI MCP23S08 を3個用いた。電池と電球については内部に何も部品が必要ないため大きさの制約はほとんどない。ただし小さすぎると扱いが難しくなるため適度なサイズの箱に端子を取り付け、電池と電球をその上に乗せて作成した。電圧計については実端子に被せるように SP 用の端子を取り付けた。最後に電球と電圧計にマーカを貼付した。

3.3 AR システムの改善（スナップ機能）

回路の動作確認を円滑に行うために、配線後にマーカ認識をする従来の手順を、配線前に行うように改める。従来システムではカメラからの映像を逐次マーカ認識部で処理し、認識に成功した場合は回路のシミュレーション結果に応じた画像をカメラ映像のマーカ位置に重畳表示していた。ここで提案するシステムでは、画面にスナップボタンを設け、ボタンがタップされるとその時のカメラ画像を保存し、以降これを背景画像に固定して、回路シミュレーションの結果に応じて重畳表示する画像のみを切り替える。

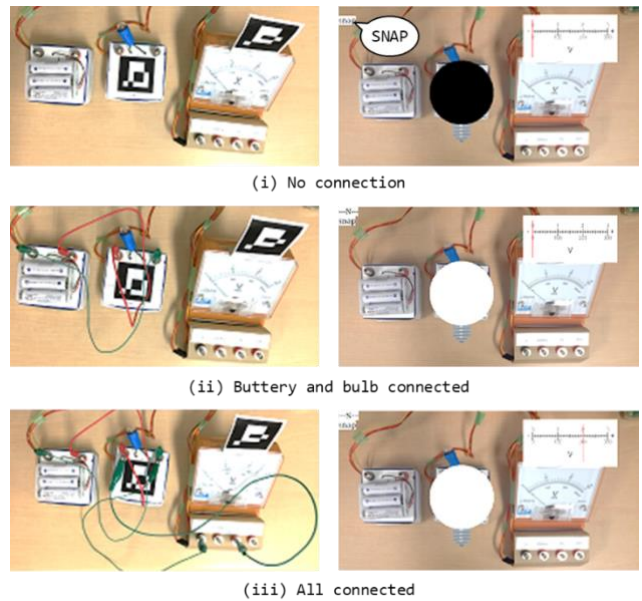
提案システムの場合、生徒はまず配線作業直前にタブレットを SP にかざし、配線前の状態（消灯している電球や、指針が0の電圧計等）を画面で確認し、スナップボタンを押す。その後タブレットを横に置いて配線を始める。作業中に配線が変わると重畳表示される画像が切り替わり、タブレットを手を持つことなく回路の状態を逐一確認できる。提案システムは最初のスナップ撮影以外タブレットを持つ必要がなく、また配線の所在に注意を払う必要がないため、回路作成に集中して実験に取り組める。

図8は実際にスナップボタンを付けた際の画面表示の例である。図の左は実際の配線中の回路、右はスナップ後のタブレットの表示画面である。タブレットの「SNAP」をタップすると映像は静止する。最初配線されていない時は、タブレット上の電球は暗く、電圧計の指針は0であるが、電球をつなぐと電球が明るくなり、さらに電圧計を接続すると電圧計の指針も動いていることがわかる。(ii)の実回路では電球の AR マーカ上に配線が被っているが、タブレットの表示に影響していないことがわかる。また当然であるが、右の AR 表示には配線済みの導線がまったく映っていないが、回路の動作確認を行う上で支障はない。

3.4 ブレッドボードに対応した Smart Parts

図9にブレッドボードによる電子工作に対応した新しい SP システムを示す。基本構成は図3と同じであるが、ブレッドボードを使用できるように以下のような構造とした。

2列ピンソケット2個を200mil(=2.54mm×2)あけてユニバーサル基板上に並べ、これに平行に市販の小型ブレッドボードを外側に2個配置する。ピンソケットの内側列には LED, 抵抗, IC など実部品を事前に挿しておき、ピンソケ



(a) Real circuit (b) View on tablet

図8 実回路と AR 表示

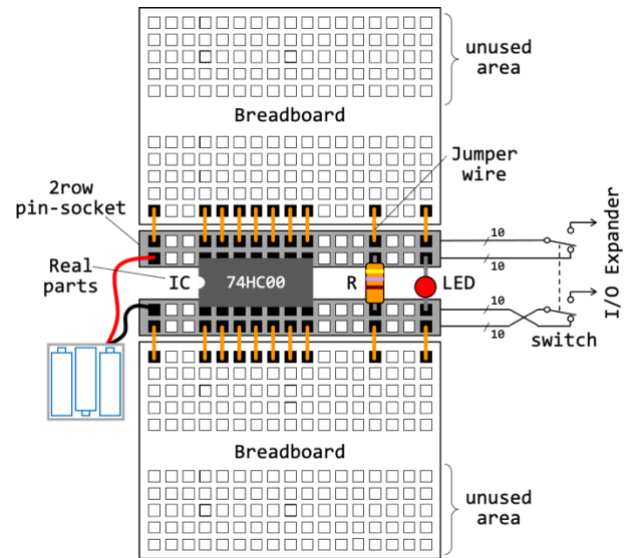


図9 ブレッドボードに対応した SP の構成

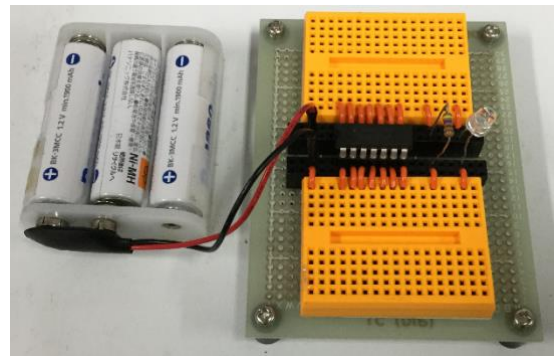


図10 ブレッドボードに対応した SP の試作例

ットの outer 列には実部品のピンが挿されたソケット穴の隣の穴と、ブレッドボード側の同列穴をジャンパー線で接続する。基板裏では外側列のそれぞれのピンから I/O エキス

パンダに向かって信号線を引き出し、途中スイッチを介して内側列の実部品に信号を戻す。

上側ブレッドボードの上半分および下側ブレッドボードの下半分は未使用エリアとし、残りのエリアで各部品間を接続する。以上のような構造によりブレッドボードの各列は I/O エキスパンダ経由でマイコンと接続され、それぞれがジャンパー線で繋がれると、それを検知することが可能となる。通常のブレッドボードでの回路作成では部品を任意の場所に配置できる。一方、本システムでは中央のピンソケットにのみに制限されるが、学校での情報教育の一環で実施される電子工作であれば、大きな制限ではないと考えられる。以上を元に試作した SP を図 10 に示す。

3.5 配線ガイド機能の実装

ブレッドボードは穴間隔が狭いこともあり、配線の多い回路を作成すると、図 11 のように多数のジャンパー線がボード上を埋めつくし、誤配線を誘発しやすい。特に初心者の場合回路図から実体配線をイメージすることに慣れないため、頻繁に誤配線が生じる。一旦誤配線すると経験者でも短時間でデバッグすることは難しく、貴重な授業時間を浪費してしまう。

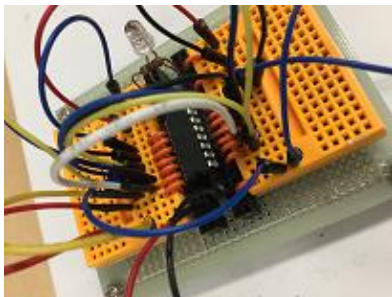


図 11 ジャンパー線で覆われたブレッドボード

そこで初心者でも円滑に配線を進められるよう配線ガイド機能を実装する。図 12 は試作した配線ガイドの表示例である（図中最左の NANDE は NAND の電源の意）。正解回路を事前に登録しておき、生徒が配線を始めると配線済みの線の色が黒からオレンジにリアルタイムで変化する。この機能は SP が常時配線を監視しているため、容易に実現できる。

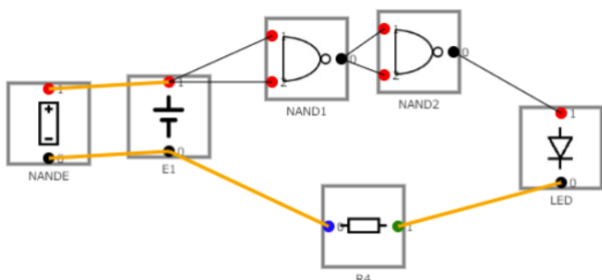


図 12 試作した配線ガイド画面

この機能により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る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。

4. 評価

提案するシステムの有効性を実験により評価した。まず電球回路の作成実験を行い、次に標準 IC とブレッドボード

による論理回路の作成実験を行った。システム評価には大学生 3 名、大学院生 4 名を被験者として以下の実験を行った。

4.1 電球回路作成実験に対する評価

4.1.1 実験方法

被験者に図 7 の新しい SP を用いて回路を作成させ、配線にかかる時間を計測した。比較として実部品を用いた場合、および従来システムを用いた場合についても計測した。

作成する回路は図 13 に示す単純な 2 つの回路で、回路 A1 では電球が光ったことを、回路 A2 では電圧計の読みを報告するまでの時間を計測した。回路 A2 の電圧計には 300mV、3V、30V の 3 つのレンジがあり、今回は 3V のレンジが最適であるよう設定した。被験者には、正しい電圧計の使用方法にしがたがって、まず最大レンジの 30V で計測し、不適当であることを確認してから 3V のレンジにすぎ変えて電圧値を読むよう求めた。

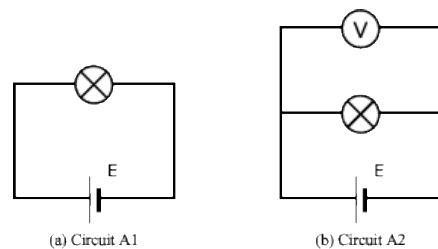


図 13 2 つの電球回路

実際の計測の前に、実部品、従来システム、提案システムの各方法で回路を作成する練習をした。公平な評価を行うために、以下のように従来システムおよび提案システムによる回路作成を交互にして計測を行った。

- ① 実部品（回路 A1、回路 A2）
- ② 従来システム（回路 A1）
- ③ 提案システム（回路 A1）
- ④ 従来システム（回路 A2）
- ⑤ 提案システム（回路 A2）

各実験は 2 回ずつ行った。配線にはワニ口クリップつき導線を用いた。

最後に、提案システムの使用感を確認するため、表 1 のアンケートを行った。また回答に対する理由や感想等を同時に聞き取った。

表 1. アンケート A

質問	選択肢
Q1. 従来システムと比べて提案システムは面倒が少ないと感じますか	1. ほとんど感じない
	2. あまり感じない
	3. ある程度感じる
	4. 強く感じる

4.1.2 結果と考察

図 14 (a) に回路 A1、(b) に回路 A2 の計測結果を示す。いずれの回路においても 1 回目より 2 回目の作成時間の方が短いことがわかる。これは 2 回目の方が作成に慣れているからであると考えられる。

また実部品による回路作成時間が最も短い。これは実部品による回路作成では AR マーカの認識が不要であるから

と考えられる。また、回路 A1 では従来システムと提案システムの差はほとんどないが、回路 A2 では提案システムの方が時間が短いことがわかる。これは回路 A2 では電圧計を読む際、まず 30V のレンジで測定し、次に 3V のレンジで測定する必要があるが、従来システムではそれぞれのレンジでマーカ認識を要するが、提案システムでは最初に 1 度だけマーカを認識するだけで良いため、その差が現れたものと考えられる。

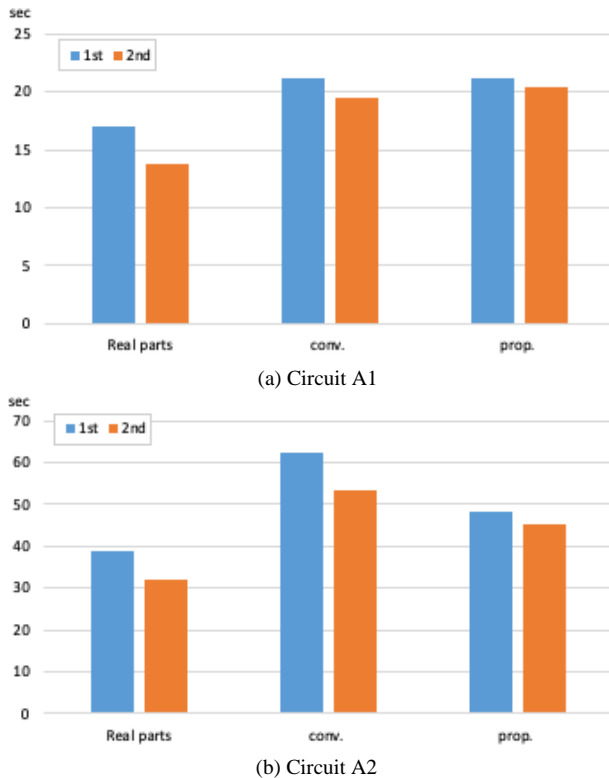


図 14 回路作成時間の比較

実験後のアンケート結果を図 15 に示す。またその後の聞き取り結果（抜粋）を表 2 に示す。図より全員が提案システムの方が面倒が少ないと感じていることがわかる。特に全員が配線中の導線の所在に注意する必要がないことを利点としてあげている。また、電圧計のレンジを変更する時や配線途中で回路の状態を簡単に確認できる点を利点とする意見があった。また従来システムと提案システムでは手数（マーカ認識のためにタブレットを持つ動作の回数）はほとんど変わらないという意見があった。これは電圧計のレ

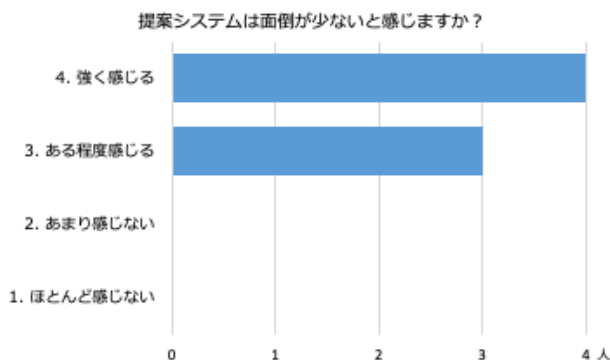


図 15 アンケート A の結果

表 2 アンケート A 後の聞き取り結果（抜粋）

- ・従来システムでは配線がマーカにかからないように注意が必要だが、提案システムだと配線を気にしなくて済む（全員同様な感想）
- ・従来システムでは電圧計のレンジを変更する毎にマーカ認識を要するが、提案システムでは最初に 1 回認識すればいいので楽。
- ・提案システムは回路の状態を確認しながら配線できるのがよい
- ・マーカ認識のためにタブレットを持つのが後か前かの違いで、その点で従来と提案システムの差を感じない。
- ・部品数が多い回路を作成する場合、配線がマーカにかかる可能性が高くなるので、提案システムの方がよい

レンジ変更時に片手でタブレットを持ち、もう片方の手で回路を修正していたため、手数の大きな違いを感じなかったと思われる。別の意見として部品数が多い回路だと配線が増えてマーカを遮る可能性が高く、その場合提案法は有利だとする意見もあった。

以上より提案する新しい SP は従来の SP と同等かそれ以下の時間で回路を作成でき、システムの簡素化・単純化（マイコンの集約、シリアル通信の廃止）の影響がないことがないことがわかった。またアンケートの結果からマーカ認識を最初の 1 度だけにすることの有効性が確認できた。

4.2 論理回路作成実験に対する評価

4.2.1 実験方法

次に標準 IC（2 入力 NAND, 74HC00）とブレッドボードを用いた論理回路の作成実験を行った。被験者は先の実験と同じである。最初に図 16 を提示し、ブレッドボードに慣れるために以下の回路を作成させた。

- ・回路 B1 図(a) LED 点灯回路
- ・回路 B2 図(c) NAND 回路
- ・回路 B3 図(d) NOT 回路

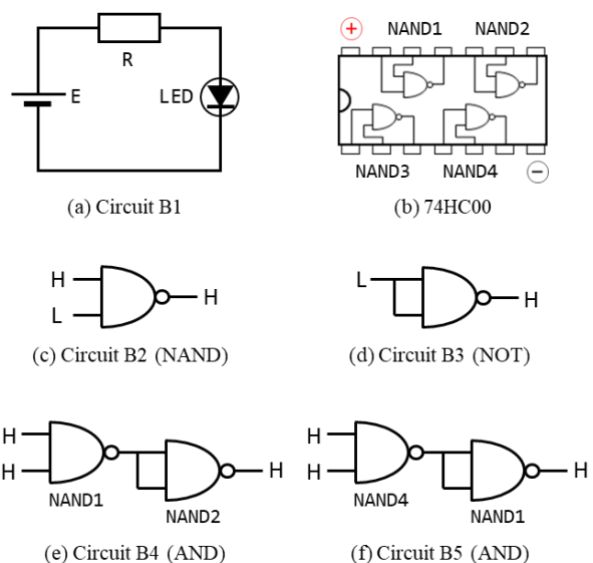
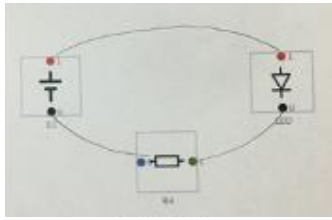
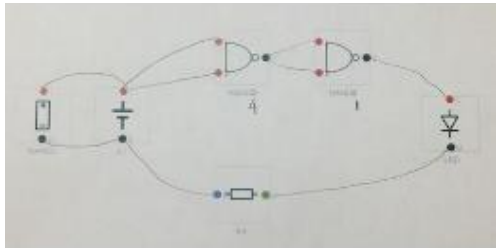


図 16 被験者に提示される回路図

回路作成前には LED の極性や NAND の使い方について説明し、図 17 のような用紙を使ってこれから接続する端子間を線でつなぐ作業をさせて、配線の予行演習をさせた。



(a) Circuit B1



(b) Circuit B4 & B5

図 17 配線の予行演習の例

以上 3 つの回路作成演習の後、以下の順で回路 B4 および B5 を作成させ、配線するときの配線時間を測定した。ただし B4 は配線ガイドあり、B5 は配線ガイドなしとした。B4 の配線前には練習時と同じく図 17(b) のような演習をした。

- ① 回路 B4 図 16(e) AND 回路 (配線ガイドあり)
- ② 回路 B5 図 16(f) AND 回路 (配線ガイドなし)

回路 B4 と B5 は回路図は同じであるが使用する NAND の位置が異なるため配線は異なる。

最後に、配線ガイドの使用感と被験者の電子回路作成の経験を確認するため、表 3 のアンケートを行った。また回答に対する理由や感想等を同時に聞き取った。

表 3. アンケート B

質問	選択肢
Q2. 配線ガイドは配線の手助けになると感じますか	1. ほとんど感じない
	2. あまり感じない
	3. ある程度感じる
	4. 強く感じる
Q3. ブレッドボードで電子回路を作成した経験はありますか	1. まったくない
	2. 一度だけある
	3. 数度ある
	4. 何度もある

4.2.2 結果と考察

図 18 に回路 B4 および B5 の配線時間の計測結果を示す。図は初心者 (Q3 で 1 または 2 と回答した 5 名) と、経験者 (Q3 で 4 と回答した 2 名) に分けて表示している。図より初心者の方が経験者よりも全体的に配線に時間がかかっていることがわかる。また経験者の場合ガイドなしの回路 B5 の方が時間が短くなっている。これは回路 B4 で配線に慣れてしまい、ガイドがなくても NAND の位置の違い程度では配線時間が伸びないことを意味している。一方、初心者は回路 B5 の方が時間がかかっており、直前によく似た回

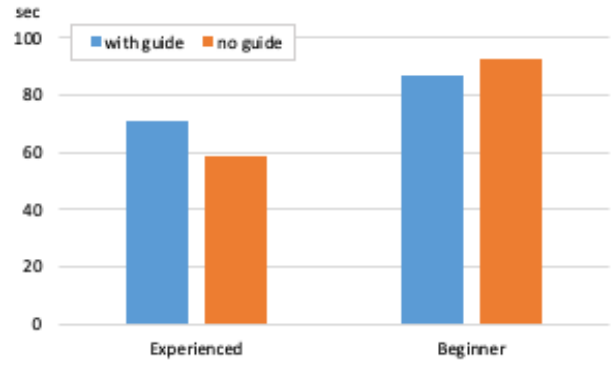


図 18 回路 B4 (with guide) と B5 (no guide) の比較

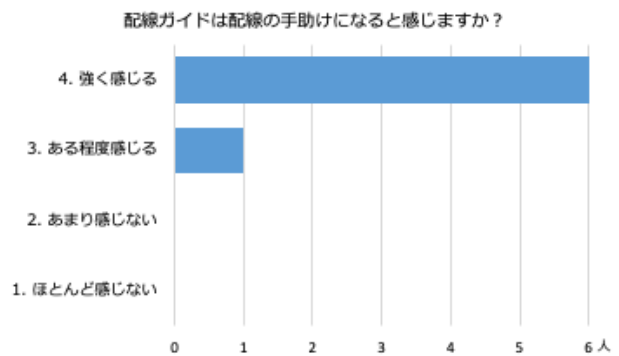


図 19 アンケート B の結果

路を作成していてもガイドがなければわずかな変化にも容

表 4 アンケート B 後の聞き取り結果 (抜粋)

<p><初心者の感想></p> <ul style="list-style-type: none"> ・回路図を実際の配線に頭で置き換えるのが苦手なので、どこをつないだのかが明確だったし、やったことが合っていることがわかった。 ・次この線をオレンジにするためにつなごう、と思ってつなぐことができたのでスムーズだった。 ・今繋いでるところを確認できるのでよかった。無い時はあつてるのか不安で、ガイドが挿した場所を教えてくれるから安心感がある。 ・どこを挿してるのかわからなくなってくるので、ガイドを見てすぐ確認できるところがわかりやすかった。 ・ガイドがあるとちゃんと繋がっているのがわかる。どこに挿したかわかるので、間違えてつなぐ恐れがない。
<p><経験者の感想></p> <ul style="list-style-type: none"> ・途中で配線を確認できるので失敗が怖くなかった。 ・今回はなくてもわかるのでガイドは必要無いが、もしもっと回路が複雑ならば必要かもしれない。デバッグは容易かもしれない。

易には対応できないことを意味している。すなわち初心者ほど配線ガイドは有用であるとわかる。

図 19 はアンケートの結果である。7 名全員が配線ガイドの有用性を感じており、特に強く感じると回答した中には経験者 1 名も含まれている。表 4 にアンケートの聞き取り結果 (抜粋) を示す。ほぼ全員が配線ガイドにより現在挿した配線の位置を確認できることを利点としてあげており、配線ガイドの有用性がわかった。

5. 関連研究

電気回路教育を支援する方策やツール、システムは、これまでに多数研究されている。実回路の作成に関する研究として、文献[3]では導電性インクを使ったペンで回路を描画する方法を、文献[4]では銅箔テープで回路を作成する方法を提案している。文献[5]は各種回路部品をブロック化して部品同士の接続を容易にするツールを提案している。これらはいずれも生徒らの回路作成や配線の手助けにはなるが、作成した回路の安全性を検査する機能はない。

回路実験を回路シミュレータを用いて行う方策についても多数研究されている[6-9]。文献[6,7]は市販のシミュレータを用いた実験方法を提案しており、特に文献[6]は専用の回路シミュレータを用いて教員養成課程の学生が自主学習できるコースウェアを提案している。文献[8,9,10]は学習用回路シミュレータを作成し、これを評価している。いずれもシミュレータを用いるため危険な回路を作成する心配はないが、回路シミュレータは使用方法の説明に時間を要し、短い授業時間を浪費する。またシミュレータは通常1人で操作するもので、グループ学習に適さない。さらに実際の部品を使った回路作成を体験できない。加えて文献[6]の被験者となった多くの学生が「達成感が大きい」、「実際の部品にさわった方が面白い」という理由で、シミュレーションより実回路実験の方が良いと回答している。

実回路とARを組み合わせた研究として、文献[11]は磁石で部品どうしを接続できるブロックを用い、ブロック上のマーカを認識して回路シミュレーションを行い、電流の流れをAR表示するシステムを提案している。本システムは電流の流れが視覚化されるが、AR表示時点で回路に電流が流れており、電源投入前に回路の安全を検出する機能はない。文献[12,13]はブレッドボードと回路シミュレータを組み合わせた回路作成の支援システムを提案しているが、これらは主に個人が行う電子回路製作を支援するシステムであり、学校現場での実験授業における教師を支援する機能はない。

6. まとめ

本研究では、電気回路の実験授業を支援するためのシステム、Smart Partsを改善する方法を提案した。まず複雑であったシステムを簡素化・簡単化するためマイコンを1つに集約し、SP間の接続関係を簡単に検知する方法を提案した。またARシステムを修正し、実験を円滑に行えるように改善した。さらにブレッドボードによる電子回路工作が行えるように改善し、配線ガイド機能を追加した。

評価実験の結果、ARシステムの改善により、従来システムより回路実験が円滑に行えることを確認した。また電子工作に対応したシステムでは、配線ガイドの機能により特に初心者にとって配線が容易になることを確認した。

今後は中学生や高校生、教師等を対象とした実験を行い、システムの有用性について評価する必要がある。また配線中の接続情報の推移（ログ）から実験の進捗を把握して教師にフィードバックするシステムや、配線の正確さを採点するシステム等について検討する。

参考文献

- [1] 仲, 太田, "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, p.11. 2020.
- [2] M. Kunihiro, M. Ohta, "A Prototype of Smart Parts Supporting Electrical Experiments at School," Proc. of IEEE 9th Global Conf. on Consumer Electronics (GCCE2020), pp.619-620, 2020.
- [3] 水野, "回路が楽しくなる電気の学習," 日本理科教育学会東海支部大会研究発表要旨集, p.13, 2015.
- [4] 榎戸, 他, "高等学校物理の電気単元における回路カードを使った実験教材の検討," 日本科学教育学会研究会報告, vol.33, no.3, pp.209-212, 2018.
- [5] 田口, "プログラミング学習ツールとしての little Bits の可能性," 日本科学教育学会研究会報告, vol.32, no.3, pp.1-6, 2017.
- [6] 遠矢, 堀ノ内, "回路シミュレーションソフトを利用した「擬似実験による自学自習システム」," 鹿児島大学教育学部研究紀要教育科学編, vol. 62, pp.157-165, 2010.
- [7] 佐々木, "回路シミュレータを活用した探究活動," 物理教育, vol.56, no.1, pp.74-76, 2008.
- [8] 高山, 平井, 金子, "対話型回路作成による電流・電圧・抵抗の関係学習システムの提案," 情報教育シンポジウム 2013 論文集, vol.2, pp.19-26, 2013.
- [9] 坂東, 澤田, 中川, "手書き配線を可能とした教育用電気回路シミュレータの設計と試作," 情報処理学会研究報告, CE, vol.65, pp.1-8, 2002.
- [10] 宍戸, 相川, 西田, 森, "シミュレーションと実験キットを連携した教材の評価," メディア教育研究, vol.4, no.2, pp.71-78, 2008.
- [11] J. Chan, T. Pondicherry, P. Blikstein, "LightUp: An augmented learning platform for electronics," Proc. of ACM Interaction Design and Children 2013 (IDC '13), pp.491-494, 2013.
- [12] Y. Kim, et. al., "A Mixed-Reality Tool for Designing and Tuning Breadboarded Circuits," Conf. of Human-Computer Interaction 2019, pp. 1-13, 2019.
- [13] T. Wu, et. al., "Enabling Prototyping of Virtual Circuits with Physical Proxies," ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.121-132, 2019.