Vol.2017-HCI-175 No.2
Vol.2017-UBI-56 No.2
2017/11/1

# 電子回路図からARを利用した三次元水路図への自動変換システムの提案

安達 拓也[1]　小島 有貴[2]　濱川 礼[3]

**概要**：本論文では電子回路図から AR を利用した三次元水路図への自動変換システムについて述べる．中学生の教育過程における「電流」単元は苦手かつ興味を惹きにくい単元であることが報告されている．中学生の「電流」単元の苦手対策として電気を水に変換する教え方があり, 効果がある事が実証されている．そこで, 本システムではスマートフォンを用いて参考書の電子回路図を写真撮影する事で自動的に（二次元）電子回路図を三次元水路図へ変換する．そして AR を用いて表示する事で中学生の「電流」単元の理解促進や学習意欲向上を図る．また, ユーザーは抵抗や電圧をタップして変換し動的に回路構築を行う事で電流の変化についてより深く学ぶ事ができる．

# Proposal of automatic conversion system from electronic circuit diagram to 3D waterway diagram using AR

Adachi Takuya[1]　Kojima Yuki[2]　Hamakawa Rei[3]

***Abstract:*** In this paper, we describe an automatic conversion system from electronic circuit diagram to 3D waterway diagram using AR. It is reported that the ”electricity” unit in the educational process of junior high school students is a weak and difficult-to-attract unit. Therefore, in this system, by photographing the electronic circuit diagram of the reference book using the smartphone, it automatically converts the two-dimensional electronic circuit diagram to the three-dimensional waterway diagram, and displays it by using the AR so that junior high school students We will try to promote understanding of ”electricity” unit and motivation of learning.The user can learn more deeply about change of current by tapping resistors and voltages and converting dynamically to construct a circuit.

## 1. はじめに

中学生の教育過程における「電流」単元は苦手かつ興味を惹きにくい単元であることが報告されている．2003 年の国立教育政策研究所の調査によると教師を対象に行った調査では「電流」単元は「生徒にとって理解しにくい」単元として全 27 単元中で 3 番目に位置している．また, 中学生を対象に行った調査では「電流」単元は「よくわからなかった」単元として全 27 単元中で 2 番目に位置している [1].

このような中学生の「電流」単元の苦手対策として「電気」を「水」モデルに変換する教え方がある [2]．これは不可視な「電気」を「水モデル」に変換することで可視化し, 理解促進に繋げるというものである．

一方, 教育現場のタブレット端末の普及により, Augmented Reality を取り入れた教材 (以下, AR 教材) が開発されている [3]．AR 教材は不可視な事象を可視化することでイメージを容易くする効果や, ユーザーの学習意欲向上させる効果がある．しかし, 教師が AR 教材を作成する事や編集することは難しい．

そこで本研究ではタブレット端末を用いて電子回路図を写真撮影する事で自動的に二次元である電子回路図を三次元水路図へ変換し, AR を用いて表示する事で中学生の「電気」単元の理解促進や学習意欲向上に繋げることを目的とする．

1　中京大学情報科学研究科情報科学専攻
2　中京大学情報理工学部情報システム工学科
3　中京大学工学部情報工学科

## 2. 関連研究

### 2.1 電気から三次元モデルへの変換

電気を三次元モデルに変換する研究は色々されてきた.

沖花らは実際の水を利用し, 電位概念を導入した水流模型を開発, 評価を行なっている [2]. この研究では, 電子回路に実際の水を利用し「電位」を水の「高さ」に変換し視覚化することで授業後に行なった調査では授業前よりも 36 %電子回路の問題に対する正答率が上がったと報告している.

高山らは電子回路を三次元に変換し PC 上に表示するシステムを開発した [4]. このシステムではユーザーが選択した回路のパターンに対して電圧の値, 抵抗の値を入力することで電子回路を三次元に変換し PC 上に表示している. また, 電圧や抵抗の値をクリックして値を変更することで電流や電圧の変化についてより深く学ぶことが可能になっている.

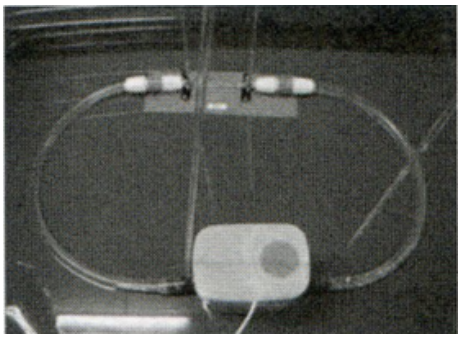

**図 1** 沖花らが開発した水流模型

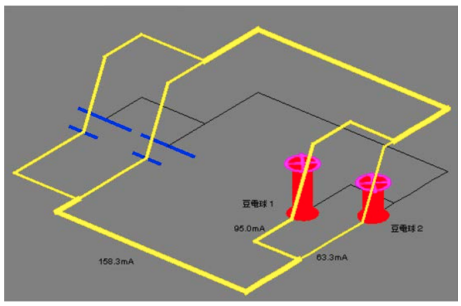


**図 2** 高山らが開発したシステム

### 2.2 AR 教材のシステム

AR 教材の研究も色々ある.

小松らは月の満ち欠けを AR を利用して表示するシステムを開発した [3]. このシステムは地球や月の公転面を立体的に表示し, さらに月に太陽に対する影を描写することで中学生の「月の運動と見え方」単元の理解促進に繋げることが可能になっている.

Joshua らは電子回路を手軽に構築できるプラットフォームを開発した [5]. このプラットフォームは磁石を用いており, 接合する事で電子回路を作成することができる. そして, 作成した電子回路を写真撮影すると電流の流れや LED 等を AR を利用して表示するため部品の働きを理解する事が可能になっている.

また, Jimmy らは AR マーカーを用いて回路に変化を与える事で電流値の変化を学習可能なシステムを開発した [6]. マーカー型の抵抗をあらかじめ用意された場所に設置すると回路が生成され, 回路を AR を利用して見せる. この時にマーカー型の抵抗を変えることで抵抗値が変化し, その結果電流値が変化する. そして, 電流値を文字で表示したり, 現実にある電球の明暗を変化させることでオームの法則の理解促進に繋げる事が可能となっている.

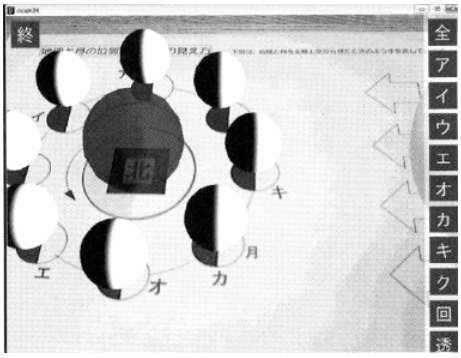


**図 3** 小松らが開発したシステム

**図 4** Joshua らが開発したシステム

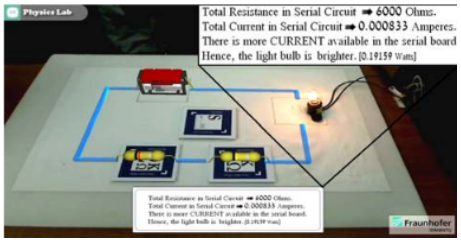


**図 5** Jimmy らが開発したシステム

### 2.3 本システムと関連研究の位置づけ

関連研究であげた沖花の研究や高山らが開発したシステムは AR を用いていない．そのため本システムでは AR を用いて中学生の「電流」単元の理解促進や学習意欲向上を図っている．また, 高山らが開発したシステムは「電流」を「太さ」に変換しているが本システムでは「電流」を「水流」に変換することで水の動きを視覚的に捉える事が可能になっている．他にも, 本システムでは形が違う「電子回路」を画像処理を用いて自動的に「水モデル」に変換することが可能となっており, 回路構築の煩雑さを解消する事が可能になっている．加えて, 高山らのシステムは電圧と抵抗値しか設定できないのに対して我々は「電流値」も設定可能なシステムを構築したためオームの法則を電流側からも学ぶ事が可能となっている．これは中学生対象の参考書 [7] によると, 電子回路に関する問題の中で「電流値」を設定しなければならない電子回路は 5 割程度出題されていたので, 必須な機能と言える．また, 小松らや Joshua らが開発したシステムの様に AR 教材は数多くあるが本システムとは学べるコンテンツが違う．Jimmy らが開発したシステムは水流モデル用いていないため電圧（水の落差）や電流 (水の流量) を視覚的に見る事が不可能である．

## 3. アイデア

我々は「AR」や「電気から水への変換」, そして「水の流量の変化」を組み合わせる事で中学生の電流単元の理解促進や学習意欲向上を図る．本システムは中学生を対象としており, 学習内容は中学生対象の参考書 [7] や高校入試の過去問 8 年分 [8] の内容である．また, 対応可能な電子回路図の条件を以下に示す．

- 電源記号が縦向きで下部に存在する事
- 抵抗記号が上部に存在する事
- 並列回路が入れ子になっていない事

対応可能な電子回路図には制限がかかるが, 上記条件は上記 [7], [8] の内容を網羅している為, 中学生対象としては問題ないと考えられる．本システムの利用イメージを図 6 に示す．

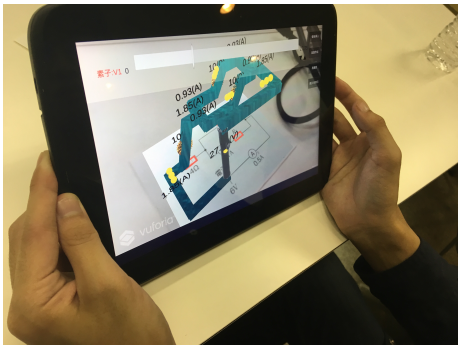

**図 6** システム利用イメージ

### 3.1 「AR」や「電気から水への変換」

本システムを用いる事で電気を水に変換し,（二次元）電子回路図を三次元水路図に変換する．そして, AR を利用する事でユーザーは不可視な電気 (電圧を水の落差, 抵抗を水車の大小, 電流を水の流量) を視覚的に見る事が可能となる．これによりユーザーは回路や「電圧」,「抵抗」,「電流」の働きをイメージする事が容易になり,「電流」単元の理解促進や学習意欲向上に繋がると考えられる．表 1 に電気と水の対応関係を示す．

| 電気 | 水 |
|---|---|
| 電圧 | 水の落差 |
| 抵抗 | 水車の大小 |
| 電流 | 水の流量 |

**表 1** 電気と水の対応関係

### 3.2 水の流量の変化

三次元水路図に対して電圧値（水の落差）や抵抗値（水車の大小）を変化させ「水の流量」の変化を視覚的に見る事が出来ればユーザーの「電流」単元の理解促進に繋がると考えられる．そこで, ユーザーが「電圧」や「抵抗」の値を変化させ三次元水路図を動的構築する事により, 水の流量が変化する機能を搭載した．この機能によってユーザーは視覚的に「電流」の変化についてより深く学習可能になる．

## 4. システム概要

本システムは画像処理部, 回路解析部, UI 部から構成されている．システム構成を図 7 に示す．本システムは Unity[9] を用いて開発した．マーカー認識には Vuforia[10] を利用し, 画像処理には OpenCV for Unity[11] を利用している．

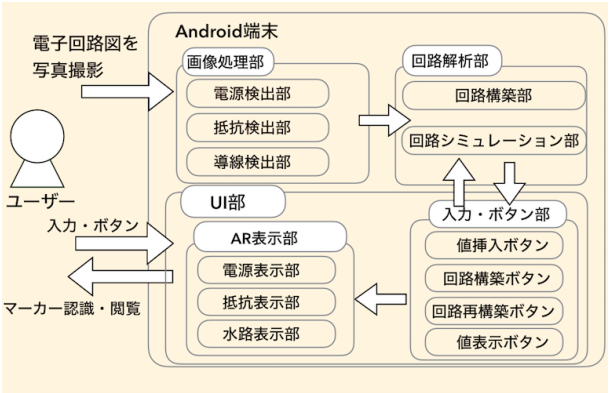


**図 7** システム概要

### 4.1 画像処理部

ユーザーが写真撮影した電子回路図に対して画像処理を施す事で「電源」,「抵抗」,「導線」を検出する．ユー

ザーが撮影した写真の例を図 8 に示す．これは中学生の参考書 [7] で出題されている電子回路図を撮影したものである．尚, 以下で述べる電源検出部や抵抗検出部で利用する全ての閾値は過去問に対して画像処理を施した結果から精度が高いものを採用した．

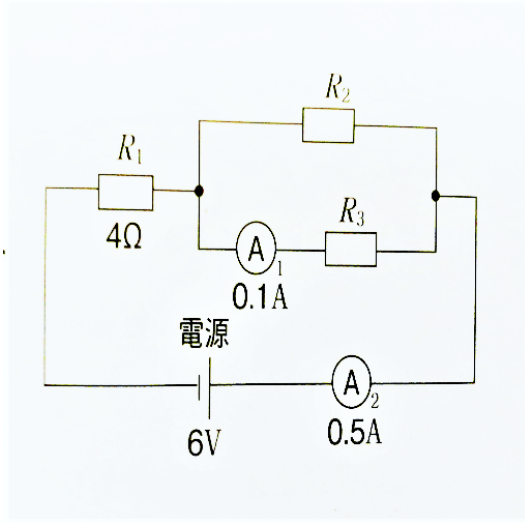


**図 8**　ユーザーが撮影した写真の例

#### 4.1.1　電源検出部

ユーザーが写真撮影した電子回路図 (図 8) に対して画像処理で「電源」を検出し, その後電源の向きを検出する．電源は縦の 2 本線で, 2 本線の中心が近いと仮定する．電源検出の流れを図 9 に示す．

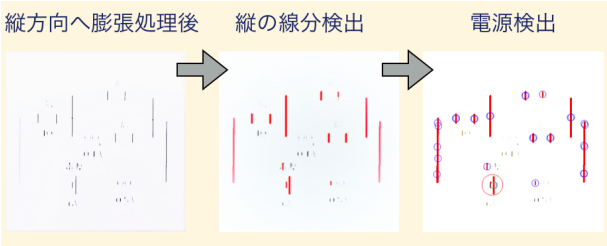


**図 9**　電源検出の流れ

電源検出部では後述する閾値を一定にするために, 画像を 512 ピクセル× 512 ピクセルにリサイズする．そしてその後, 縦の 2 本線を検出するために,「電源」と誤認識する可能性がある「R」や「A」などの文字削除を行う．そのために縦方向に膨張処理を行う．そして, その後エッジ検出を行い, 縦の線分だけを検出する．縦の線分だけが残った画像に対して線分の中心の距離が 10 ピクセル (閾値 A) 以上かつ, 30 ピクセル (閾値 B) 以下にあるペアを抽出し, ペア同士の中心座標の縦の差が 10 ピクセル (閾値 C) 以下の場合電源とする．その後, 電流の方向を取得するためにペアとなった線分の長さに応じて電源の向きを検出する．

#### 4.1.2　抵抗検出部

ユーザーが写真撮影した電子回路図 (図 8) に対して画像処理で「抵抗」を検出し, その後抵抗の番号を電源の向きに応じて並び替える．抵抗は四角形で, 四角形の面積が 210 ピクセル (閾値 D) 以上, 600 ピクセル (閾値 E) 以下だと仮定する．抵抗検出の流れを図 10 に示す．

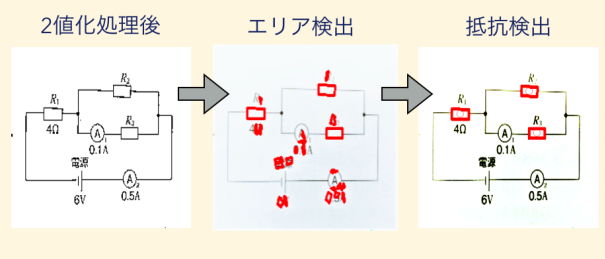


**図 10**　抵抗検出の流れ

抵抗検出部では後述する閾値を一定にするために, 画像を 256 ピクセル× 256 ピクセルにリサイズする．そしてその後, 四角形を抽出するためにグレースケール化, 2 値化処理を行う．そして輪郭抽出処理と直線近似処理を行う事でエリアを検出する．その後, 検出した各エリアの面積を求める．各エリアの面積が 210 ピクセル (閾値 D) 以上, 600 ピクセル (閾値 E) 以下の中から頂点が 4 つのものを抵抗とする．抵抗検出が完了したら, 抵抗の番号を電源の向きに応じて並び替える．電源が右向きの場合は画像の右上から近い順に並び替え, 左向きの場合は画像の左上から近い順に並び替える．

#### 4.1.3　導線検出部

ユーザーが写真撮影した電子回路図 (図 8) に対して画像処理を施す事で「導線」を検出する．導線は図 11 の右図, 青線の様な電源から最初の分岐地点や抵抗, 及び赤線の様な最後の分岐地点や抵抗から電源の事である．導線検出の流れを図 11 に示す．

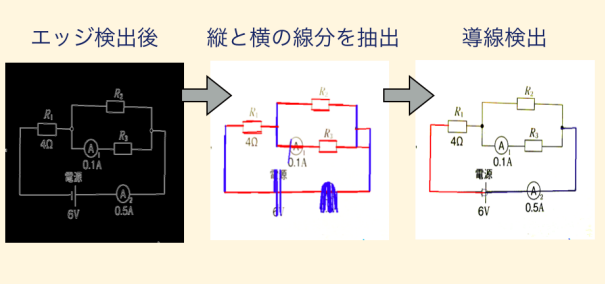


**図 11**　導線検出の流れ

導線検出部ではまず, グレースケール化, エッジ検出を行う．そして検出したエッジの中で縦の線分と横の線分を残す．そして電源から右の最長の線分, その線分から上方向の最長の線分, 更にその線分から左に伸びる線分又は抵抗までの線分が導線の 1 つである．もう 1 つの導線も逆方向

に同様に行う.

### 4.2 回路解析部

回路解析部は回路シミュレーションを行うために画像処理部で得られた「電源」,「抵抗」,「導線」の座標を元に回路構築する事を目的としている.

#### 4.2.1 回路構築部

回路構築部では自作の回路シミュレータに対して計算可能なデータ構造を構築するために, 画像処理部で取得した「電源」,「抵抗」,「導線」の座標を元にデータ構造の構築を行う. 電流の流れに沿ってリスト構造に電源 (V), 抵抗 (R), 導線 (W), 分岐 (B) を追加していく. 最初に電源 (V) と電源から繋がる導線 (W) を追加する. その後, 抵抗が直列に繋がっているか並列に繋がっているかを位置関係によって判別し, リストへの追加方法を決定する. 抵抗の $x$ 座標が他の抵抗の $x$ 座標と比べて, 100 ピクセル以内に無い場合, つまり抵抗が他の抵抗と縦関係に無い場合は直列に繋がっているとし, 図 12 上部の様に電源 (V) が所属するリストに追加していく. 抵抗の $x$ 座標が他の抵抗の $x$ 座標と比べて, 100 ピクセル以内にある場合, つまり抵抗が他の抵抗と縦関係になっている場合は並列に繋がっているとし, 図 13 左部の様に電源 (V) が所属するリストに分岐 (B) を挿入し, 分岐内の二次元リストに導線 (W), 抵抗 (R), 導線 (W) を追加する. 最後に電源 (V) が所属するリストに導線 (W) を追加する事で電子回路のデータ構造が完成する. 図 14 に直列回路と並列回路が混ざった回路 (図 8) のデータ構造を例として挙げる. 尚, 図 12, 図 13, 図 14 中の $i$ は電源 (V) が繋がっているリストの添え字, $j$ は分岐 (B) 内の二次元配列の並列の行数, $k$ は $j$ 行目のリストの添え字と定義する. 加えて, $l$ は回路全体に存在する抵抗の数, $m$ は回路全体に存在するワイヤーの数と定義する.

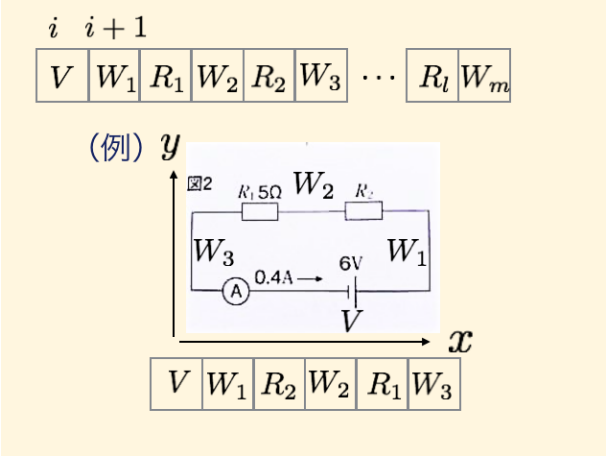


**図 12** 直列回路のデータ構造と例

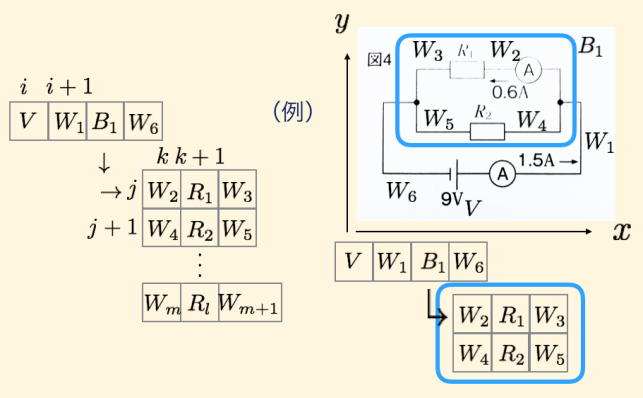


**図 13** 並列回路のデータ構造と例

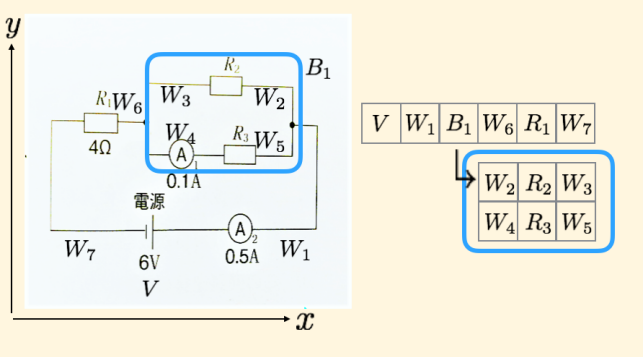


**図 14** 直並列回路のデータ構造と例

### 4.3 回路シミュレーション部

回路シミュレーション部では回路構築部で得られたデータ構造とユーザーが各素子に与えた値から回路シミュレーションを行い, 未知数を自動計算する. 各素子の未知数をオームの法則を用いて解いている.

### 4.4 UI 部

UI 部は AR 表示部と入力・ボタン部から構成されており, 回路解析部で得られた回路情報を元に電子回路図を三次元水路図へと変換する. 本システムの初期画面を図 15 に示す.

#### 4.4.1 AR 表示部

AR 表示部では AR を用いて、 回路解析部で得られた回路情報を元に電子回路図を三次元水路図へと変換する.

- 電源表示部
  電圧値の大きさに比例してポンプの高さを表示.
- 抵抗表示部
  抵抗値の大きさに比例して水車の大きさを表示.
- 水路表示部
  電流値の大きさを水の流量で表現するために波の速さを変化. また波の速さを見やすくするために, 黄色の球体が水路上を流れるようになっている. 水の表現には Unity の Standard Assets に含まれている Water を利用した [12].

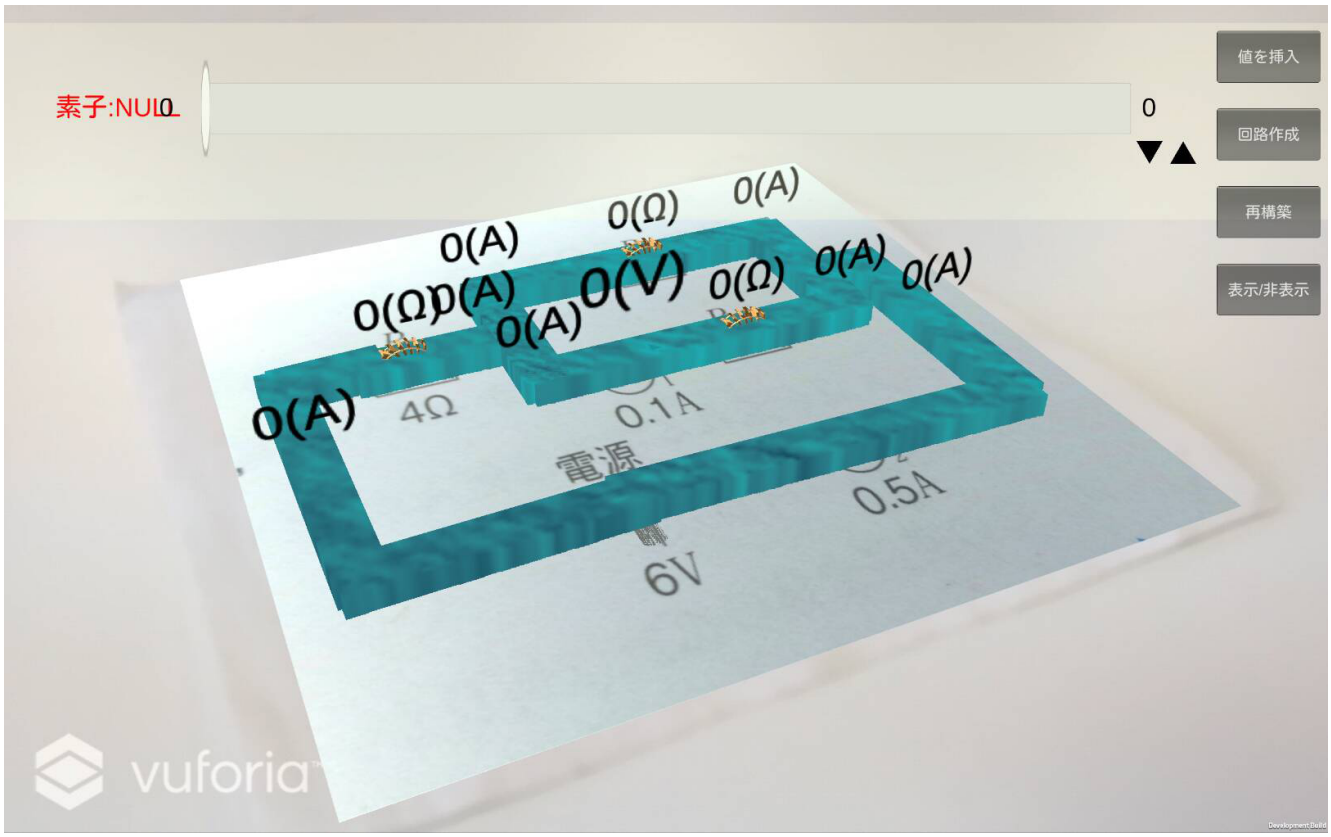


**図 15** 初期画面

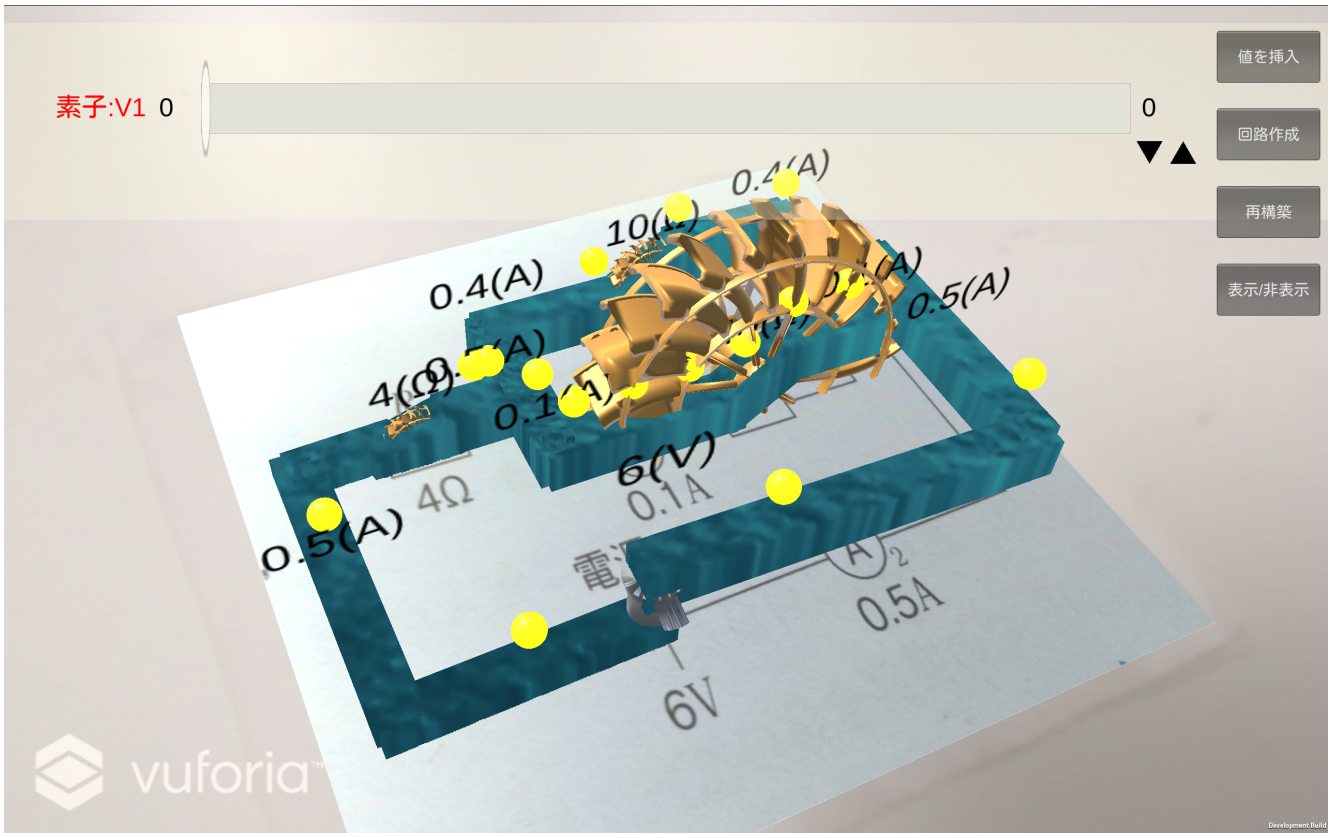


**図 16** 図 15 に対して電子回路図の値を設定し, 三次元水路図を構築した結果
ポンプ:6[V], 左の水車:4[Ω], 水路:(0.5[A], 0.1[A]) を設定

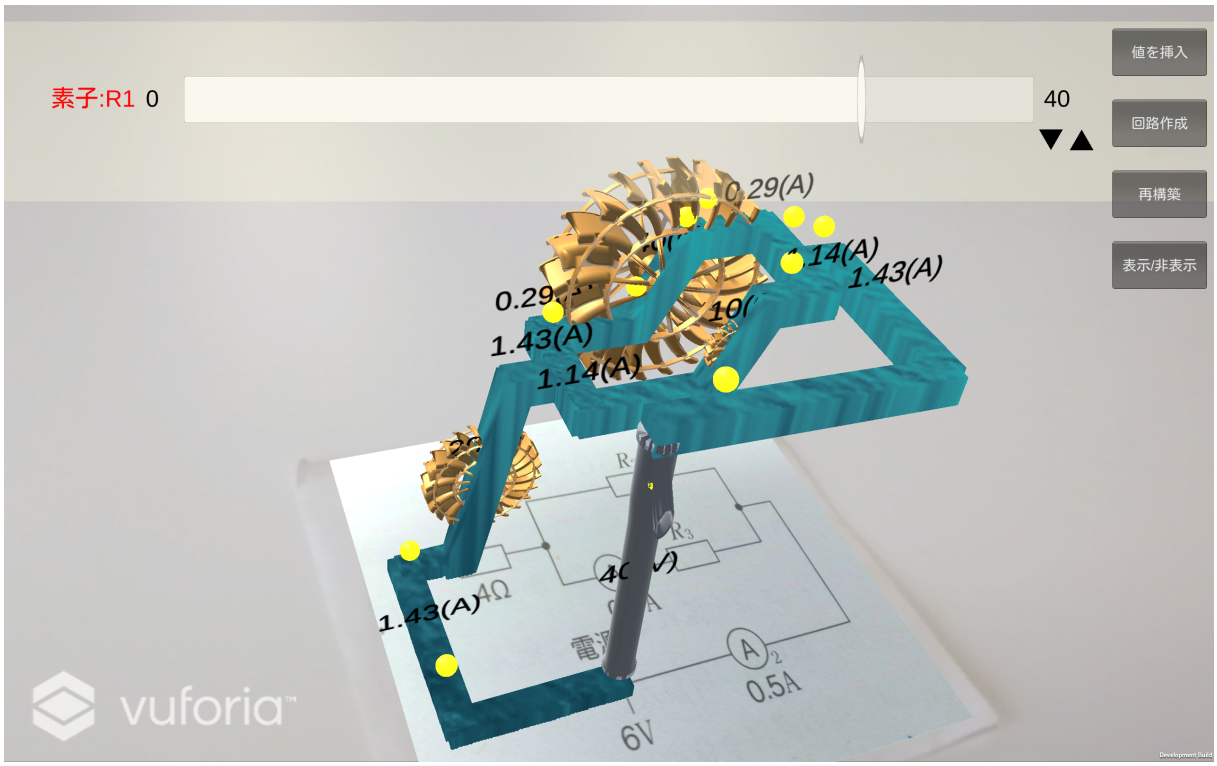


**図 17** 図 16 の電圧値と抵抗値を再設定し, 電圧値と抵抗値から三次元水路図を構築した結果
ポンプ:40[V], 水車 (左:20[Ω], 右奥:40[Ω], 右手前:10[Ω]) を設定

| 質問番号 | 質問内容 | 点数 |
|---|---|---|
| Q1 | 中学生が本システムを用いることにより「電流」単元に興味を持てると思うか | 3 |
| Q2 | 電気回路を水路に置き換えると理解が深まると思うか | 3 |
| Q3 | 中学生が本システムを用いることによって「電流」単元の理解が深まると思うか | 3 |
| Q4 | 電圧や抵抗の値を変えて回路を再構築することで電圧, 抵抗, 電流の変化を視覚化するのは効果的だと思うか | 3 |
| Q5 | AR を用いているのは効果的だと思うか | 4 |
| Q6 | 先生が本システムを用いることにより中学生に教えやすいと思うか | 3 |

**表 2** アンケート調査結果

#### 4.4.2 入力・ボタン部

入力ボタン部ではユーザーの入力を受け付ける事で三次元水路図に様々な変更を加えることを可能にする. 本システムの利用方法と各ボタンの説明を伴せて記す. 本システムを起動し, タブレット端末のカメラをマーカーに向けると図 15 のような初期画面が起動する. そして, 図 15 に対して読み込んだ画像の数値を入力するためにポンプ, 水車, 水路をタッチし上部にあるスライダーの値を変更する. その後,「値を挿入」ボタンを押すとタッチしたオブジェクト (ポンプ, 水車, 水路) にスライダーの値を入力する. 初期値は図 8 の値通り, 図 15 のポンプに 6[V], 左の水車に 4[Ω], 水路に 0.5[A] と 0.1[A] を設定する. そして,「回路作成」ボタンを押すと図 16 のような三次元水路図が自動構築される. ユーザーは図 16 から回路の働きや各素子の働きを視覚的に学習する事が可能になる. 例えば抵抗が並列に繋がっている箇所では電流（水の流量）は並列に繋がっている各抵抗の値（水車の大小）によって変わる事を視覚的に学ぶ事が可能になる.

そして図 16 を作成した後に, ポンプや水車をタッチして電圧値や抵抗値を再設定する事で電流の変化を視覚的に学ぶ事ができる. 例えばポンプに 40[V], 水車に (左:20[Ω], 右奥:40[Ω], 右手前:10[Ω] を設定した後に「再構築」ボタンを押す事で図 17 のように三次元水路が変化する. ユーザーはこの機能によって二次元では表現できない「電流の変化」を視覚的に見る事が可能になる.

## 5. 評価

### 5.1 AR 教材としての有用性の評価

本システムを利用することにより中学生の「電流」単元の理解促進や学習意欲向上に繋がるかどうかを検証するために評価実験を行なった. 評価方法は「電流」単元の指導経験がある教師 1 名を対象にシステムを利用してもらい, その後アンケートに回答してもらった. アンケートは 4 択の選択形式となっており (4:非常に思う, 3:思う, 2:思わない, 1:非常に思わない) から選択してもらった.

評価結果は表 2 に示した通り良好な結果になった. 質問

番号 Q1 と Q3 から本システムを用いることにより中学生の「電流」単元の理解促進や学習意欲向上に繋がると考えられる．また, 質問番号 Q6 から本システムは先生が中学生に指導する時にも有効であると考えられる．また,「水の流量は太さよりも水の流れを可視化しているためイメージしやすい」といった意見があった．一方で,「黄色の球体は電子と非常に似ているため電子と間違えて学習してしまう可能性がある」や「黄色の球体はスピードではなく球体の量に変更した方がイメージしやすい」と言った意見があった．加えて「マーカーにタブレット端末のカメラの焦点を合わせるのが難しく面倒」といった意見もあった．

### 5.2 画像処理の精度に関する評価

画像処理を用いて電子回路図から三次元水路図を正しく構築可能かどうかを検証する．そのために必要な各素子の検出率を評価実験を行なって算出し, その後, 三次元水路図が正しく構築できる確率が実用に十分であるかを検証する．評価方法はタブレット端末のカメラを使用して撮影した電子回路図から「電源」,「抵抗」,「導線」の検出率を算出する．また, 中学生対象の参考書 [7] に出題されている 12 問を対象に行なった．

各素子の検出率を表 3 に示した通り概ね良好だったが, 電源が 1 つ未検出, 抵抗が 1 つ誤検出だった．電源が検出できなかった理由としては撮影した電子回路図が若干小さく縦の線を検出できなかったためである．また, 抵抗を誤検出した理由としては 5 角形を 4 角形と判別してしまう事があったためである．

三次元水路図を正しく構築するためには各素子が全て正検出であり, 未検出や誤検出がない必要がある．つまり今回の評価実験では電子回路図 12 枚中 2 枚に対して, 素子の未検出や誤検出があったため 12 枚中 10 枚（83.3%）が三次元水路図を正しく構築できる確率となる．そのため, 今回の評価実験では実用十分な結果となった．

| | 計測数合計 | 正検出数 | 検出率 | 未検出数 | 誤検出数 |
|---|---|---|---|---|---|
| 電源 | 12 | 11 | 91.6% | 1 | 0 |
| 抵抗 | 24 | 24 | 100% | 0 | 1 |
| 導線 | 24 | 24 | 100% | 0 | 0 |

**表 3** 各素子の検出率に関する評価

## 6. 終わりに

本研究では電気を水に変換し AR を用いて表示する事で, 中学生の「電流」単元の理解促進や学習意欲向上に繋がるシステムの開発と効果の検証のために評価実験を行なった．

評価実験の結果, 本システムを用いることにより中学生の「電流」単元の理解促進や学習意欲向上に繋がる事が示唆された．加えて, 本システムを用いることにより教師が中学生に対して「電流」単元を指導しやすくなる事がわかった．一方で黄色の球体が電子と似ている為, 中学生に対して誤解を与えてしまう可能性があると分かった．そのため黄色の球体を「スピードから量に変更する事」や「色や形」を変える必要がある事が分かった．

また, 画像処理を用いて電子回路図から三次元水路図に変換することは可能だが「素子間の繋がり」を検出するのは難しく, 対応可能な電子回路図は中学生で出題される問題程度と分かった．

今後の展望として, より本システムを使いやすくするためにマーカーレス型 AR を利用する事やメガネ型デバイスを使って三次元水路図を表示する事を検討している．また, 本論文では評価人数が教師 1 名と少ない為, 中学生や教師を対象に大規模に評価実験を行う等, 被験者を増やして本システムの有用性を調査していく．

## 7. 参考文献

### 参考文献

[1] 平成 15 年度小中学校教育課程実施状況調査,http://www.nier.go.jp/kaihatsu/katei_15，国立教育政策研究所，2003 年.
[2] 沖花彰, 谷口信一, 中学校電気分野における電位概念の導入と学習教材の開発,http://natsci.kyokyo-u.ac.jp/ okihana/dennatu.pdf，日本物理教育学会，2009 年.
[3] 小松祐貴, 渡邉悠也, 鬼木哲人, 中野博幸, 久保田善彦, 月の満ち欠けの理解を促す AR 教材の開発と評価,https://www.jstage.jst.go.jp/article/ jssej/37/4/37_KJ00008988007/_pdf，日本科学教育学会，2013 年.
[4] 高山透, 平井佑樹, 金子敬一, 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,http://www1.iwate-ed.jp/tantou/kagaku/kyouzai/1_buturi/denryu_simulation.pdf, 高山秀，2013 年.
[5] ”Joshua Chan ,Tarun Pondicherry ,Paulo Blikstein” ,“LightUp:An augmented,learning,platform,for,electronics”, http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2485760.2485812, *IDC*,2013.
[6] ”Jimmy Junming Peng ,Wolfgang Muller Wittig” ,“Understanding Ohm’s law: enlightenment through augmented reality”, https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1899960&, *IDC*,2013.
[7] くもんの中学基礎がため 100 中 2 理科 第 1 分野編 — 学習指導要領対応 粒子・エネルギー ,http://kumonshuppan.com/gakusan/gakusan-syousai-chugaku/?code=59680，くもん出版，2012 年.
[8] 愛知県公立高校過去 8 年分入試問題集,http://kyoei-syuppan.net/books-h/?isbn=978-4-290-09269-3，教英出版，2016 年.
[9] Unity, https://unity3d.com/jp, ユニティ・テクノロジーズ.
[10] Vuforia ,https://developer.vuforia.com/, PTC.
[11] OpenCVforUnity, https://www.assetstore.unity3d.com/jp/#!/content/21088, EnoxSoftware.
[12] Unity Standard Assets , https://docs.unity3d.com/jp/540/Manual/HOWTO-Water.html, ユニティ・テクノロジーズ.