

マーカー型 AR とセンサーを用いた物理(回路・力学)実験教材の開発

塩澤 秀和¹⁾, 小松 京平^{1)*}

1) 玉川大学 工学部 ソフトウェアサイエンス学科

あらまし: 本論文では、マーカー型 AR とセンサーを用いた物理実験教材として、我々が開発を進めている 2 つのシステムについて述べる。電気・電子回路実験への適用では、回路素子にマーカーを付与することで回路の状態を認識し、測定したデータを画面に合成して表示する。力学(力と運動)実験への適用では、加速度センサー等を搭載したセンサーボックスにマーカーを付与し、力や力学的エネルギーを画面に合成して表示する。これらの方法によって、学習者の興味と理解を促進する実験教材を実現することを目指している。

Development of Educational Systems with Marker-Based AR and Sensors for Physics (Circuits / Dynamics) Experiments

Hidekazu Shiozawa¹⁾, Kyohei Komatsu^{1)*}

1) Department of Software Science, College of Engineering, Tamagawa University

Abstract: This paper describes the two educational systems under our development for physics experiments, using marker-based AR and sensors. In application to electric / electronic circuit experiments, markers are attached to the circuit elements and the measured data is superimposed on the camera image. In application to dynamics (force and motion) experiments, a marker is attached to the sensor box with built-in acceleration sensors etc., and force and mechanical energy are superimposed on the video image. By these methods, this project aims to promote learners' interest and understanding in physics experiments.

1. はじめに

AR (Augmented Reality, 拡張現実感) 技術の中でも、2 次元マーカーとスマートフォンやタブレット端末を用いるマーカー型・シースルー型の AR は、手軽に実現できるため広く普及している。この方式では、物体に貼付された 2 次元マーカーの ID と 3 次元位置をカメラ映像の画像処理によって認識し、現実のリアルタイム映像にコンピュータグラフィックス (CG) 等による情報を重ね合わせて画面に表示する。

近年、このような AR 技術を教育分野に活用することによって、紙の教科書や実験装置などの教材、さらには博物館や公園などの環境と、コンピュータで生成した CG や動画といった電子教材を連携させ、コンピュータによって強化された学習環境を実現する提案が活発である。

このような背景のもと、我々もマーカー型 AR

とセンサーを用いた物理実験教材の開発を進めている。理工系の教育においては、現実のモノを扱う実験が重視されており、学習者は五感を通して現実のモノの動きや反応を体験することにより、学習内容の現実への応用を見すえた深い理解を得ることが期待される。しかしながら、例えば物理学の実験では、電流・電圧・力・エネルギーなどの物理量はそのままでは人間の目に見えないので、目の前で何が起きているのか興味を持ってない学習者も多い。特に物理量の時間的な値の変化を理解するためには、豆電球を付けるなどの工夫ができない場合、測定データをグラフ化し、さらにそれを見て解釈するスキルが必要になる。

本プロジェクトでは、実験で用いる測定器および実験の装置・器具・環境などの教材に取り付けたセンサーから、実験装置の状況や測定データを取り込み、それを分かりやすく可視化して、カメラで撮影した教材の映像に画面上で合成する。これによって、学習者の興味と理解を促進する実験教材を実現することを目指している。

* 2017 年 3 月 同学科卒業

本論文では、マーカー型 AR とセンサーを用いた物理実験教材として、我々が開発を進めている 2 つのシステムについて述べる。電気・電子回路実験への適用では、回路素子に AR マーカーを付与することで回路の状態を認識し、測定したデータを PC に取り込み、画面に合成して表示する。力学（力と運動）実験への適用では、加速度センサー等を搭載したセンサーボックスに AR マーカーを付与し、センサーの出力値から計算した力や力学的エネルギーを画面に合成して表示する。

2. 関連研究

AR を利用した中学校の理科教材の提案として凸レンズの働きを題材としたもの[1]がある。これは中学 1 年生を対象にした教材であり、光学台に置かれた光源と凸レンズに AR マーカーが付与されている。そして学習者がカメラ越しにシステムを見ることによって、光源と凸レンズによってできる像を CG モデルで表示し、さらに光路も表示する。これによって学習者は、レンズによる光の進み方と光源とレンズの位置によって変化する像の現れ方について理解することができる。さらに光の道筋の作図ができるようになる。

また、AR を用いた大学の化学実験の支援システムとして ost4ce [2]がある。これはマーカーを貼付した実験器具を用い、システムは実験の様子を真上からカメラで撮影して認識し、プロジェクタを通してテーブル上に起こり得る危険に注意を促すメッセージ等を投影する。これによって学生の化学実験における安全確保に関する技能を向上させることを目的する。

電子回路の学習と AR を組み合わせた子供向けの知育教材としては、LightUp [3]等が開発されている。これは、回路の素子とその配線をパズルのピースのようなパーツに組み込み、このパーツを組み立てることで電子回路の学習ができる知育玩具である。さらに、回路をスマートフォンで撮影すると、パーツの模様と形状から回路を認識し、電気を流した場合のシミュレーションを見ることが

もできる。パズル形式のため、子供にも学びやすいように考えられている。

また、AR を用いていないがセンサーを利用した力学教材の例として、Wii リモコンを用いた実験教材[4]も提案されている。これは Wii リモコンに加速度センサー、Bluetooth 通信機能、赤外線カメラ等の各種センサーが搭載されていることに着目し、力学台車に乗せて斜面を下る Wii リモコンの位置、速さ、加速度をリアルタイムに解析・表示できるシステムである。

これらの他にも、紙の教科書やプリントにマーカーを印刷し、それをカメラで撮影して認識することでその場に動画や CG のシミュレーションを重ね表示するシステムなども提案されている。

3. 本プロジェクトの取り組み

本プロジェクトでは、マーカー型 AR とセンサーを用いた物理実験教材の開発を進めている。これは、実験で用いる測定装置、その他の器具、環境などの教材に取り付けたセンサーから、PC に測定データを取り込み、そのデータをグラフなどで分かりやすく可視化して、カメラで撮影した教材の映像に画面上で合成する。

物理学の学習教材としては、実験の様子を撮影したビデオ教材や、実験装置等を用いずに画面内のシミュレーションで完結するインタラクティブ教材もある。確かに、そのような教材には手軽にどこでも安全に実行できるという大きな利点があるが、それらは実験による教育を完全に代替するものではないと考えられる。

なぜなら、自分の手で実際の装置や器具を使うことによる操作の実感および緊張感、現実のものを扱うゆえに必要な細かいクセや小さなトラブルに臨機応変に対処する機会、様々な外的要因によって理論通りの結果が出なかった場合に原因を究明して手順を修正することなどは、実験によって実際のモノを扱うからこそ体験できるからである。

この実験の利点を活かすためにも、センサー等を用いて実験装置の状態を得て、リアルタイムな

現実の測定結果に基づく状況表示をすることによって、単に AR を用いて付加情報を表示するだけでない効果が得られると考えている。

4. 電気・電子回路実験への適用

4.1 AR 回路実験支援システム

電気・電子回路への適用では、回路の各素子に AR マーカーを付与し、それをカメラによって認識する。システムは学習者が作成している回路の接続を模範解答と照合することで、現在の進捗状況や次に行うべき指示を判断する。そして、素子の説明、回路の接続状況、実験の手順などを、カメラ映像に合成して表示する。これらの機能によって学習者が自ら適切な情報を取得し、問題を解決することを目標としている。

4.2 システムの構成

本システムでは、回路素子とそれをつなぐ導線（コード）は、なるべくそのままの形が見えるようにした上でマーカーを付与し、ほぼ真上に設置したカメラでマーカーを撮影することで、その位置関係から素子の接続を自動認識する。

トランジスタや抵抗などの回路素子は小さいので直接マーカーを付けることができない。そこで、図 1 のように消しゴムに切り込みを入れて素子をはさみ、あまった部分にマーカーを貼ることでパーツ化した。この手法は手軽にパーツを増やすことができるので、講師は比較的柔軟に問題を作成することができる。

また、回路作成の試行錯誤を可能にするために、素子の接続には両端がワニ口クリップ（みのむし

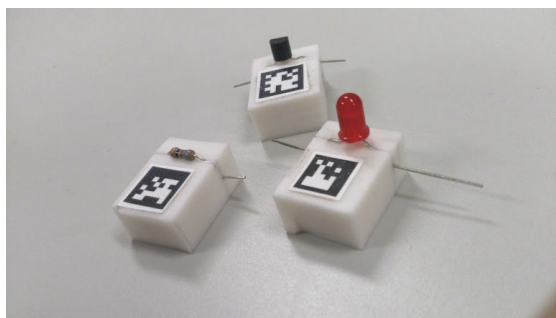


図 1 AR マーカーと回路素子

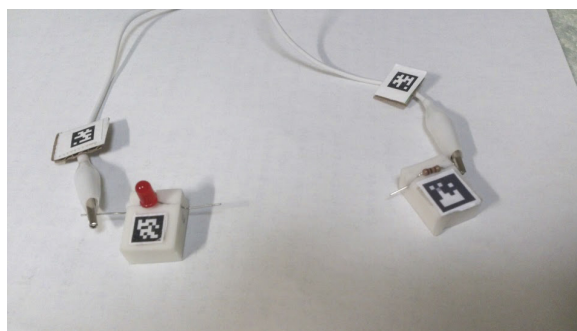


図 2 導線による素子の接続

クリップ）の導線を採用し、パーツから出た素子の端子をクリップではさんで回路を作成することとした。図 2 に示したように導線の両端にマーカーを付与し、素子と導線のマーカーの位置関係から接続状況を認識するようにした。

ソフトウェアの開発は、Windows 7 上で Visual Studio 2010 の C++ を使用して行い、ライブラリとして Cinder と ARToolkitPlus を利用した。これらを利用した理由は、本研究では図 1 のようにマーカーのサイズを回路の素子に合わせて小さくする必要があったが、Cinder と ARToolkitPlus の ID マーカーとの組み合わせでこの条件を満たすことができたからである。

4.3 回路の接続の認識

本システムは、学習者が作成している回路上のマーカーの位置関係から接続関係を認識し、それを模範解答と照合することで、現在の進捗状況や次に行うべき指示を判断する。これらの機能を使用し、学生は回路実験に取り組む。図 2 は実験の準備の状態であり、図 3 は、回路素子の接続状態が PC 上で認識されている画面である。

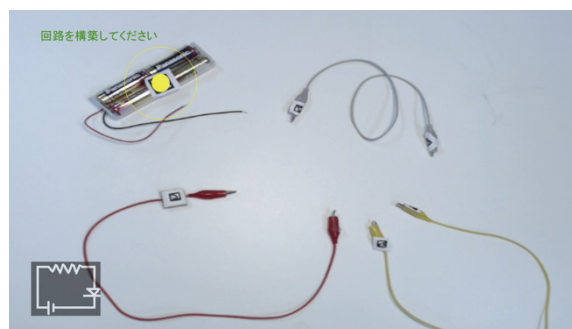


図 3 回路実験の準備

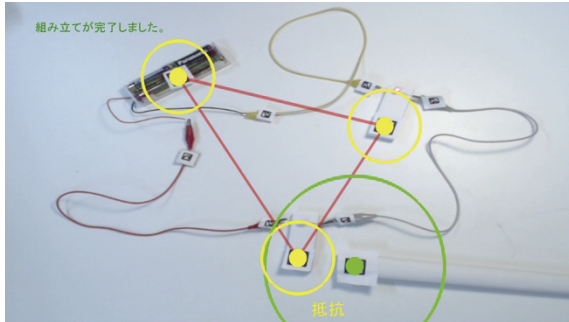


図 4 回路の接続の認識

本システムでは学習者は教科書の説明を見ながら回路を組み立てて実験を進める。その際、正しく素子が接続できた部分は緑色の線が表示され、誤った部分は赤色の線が表示されるので、色を手掛かりとして回路の作成を進めることができる。

他にも素子のマーカーの認識や素子と導線の接続状況などをリアルタイムに表示する。回路が全て完成し正解すると解説が表示される。学習者は回路図やそれに必要な回路素子の一覧を表示することや、素子を机上右下の領域に置くことでその詳細説明を参照することも可能である。

4.4 測定データの取得と表示

現状では、PC に接続して測定データを取り込める SainSmart 社の USB オシロスコープキット DDS140 を利用して、プローブをつないだ位置の電位の最大値・最小値を PC に取り込み、画面に数字で表示することが実現されている。

現在は画面の端に確認のための数値が表示されるだけなので、プローブの位置に合わせた AR による表示が今後の課題である。また、マーカー付与した小型のセンサーから Arduino 等で測定データを取り込むよう開発を進めている。

4.5 現状と今後の課題

回路実験においては、学習者は手元を見ながら素子を接続していくので、PC やタブレット端末の画面を見ながら実験を進めるのは難しい。そこで、本システムはそのような利用方法に対応し、画面表示だけでなくプロジェクタを使って机上の回路に直接投影するモードも備えている（図 4）。ただし、この機能は事前の位置合わせ（キャリブ

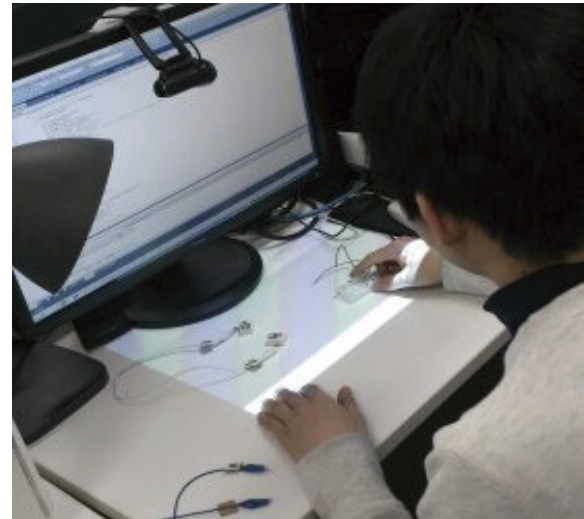


図 5 プロジェクタによる回路への投影

レーション）が煩雑なのが課題である。

また、本システムで採用したマーカーによる接続認識は、接触不良等までは認識できない（極端に言えばワニ口で挟んでいなくても近くに置けば接続とみなされる）ので、画面上で正解と表示されても電源のスイッチを入れたときに実際に回路が動作するとは限らない。ただし、そのような場合でも、素子の配置が間違っていないことは大きな助けとなるだろう。

5. 力学実験(力と運動)への適用

5.1 AR 力学実験支援システム

力学（力と運動）への適用では、基本的な力学（運動方程式や力学的エネルギー）の実験を想定している。システムは、USB カメラで撮影した実験環境の映像に、現実には物体にかかっている力と力学的エネルギーをグラフと文字列の形式でリアルタイムに重ね合わせて表示する。これによって、学習者が、力の合成と分解の作図や位置エネルギーと運動エネルギーの関係について、従来よりも直感的に理解できるようになることを目標としている。

5.2 システムの構成

本システムでは、図 5 のように AR マーカー、加速度センサー、Bluetooth モジュールを内蔵した簡易的な力学台車といえる「センサーボックス」

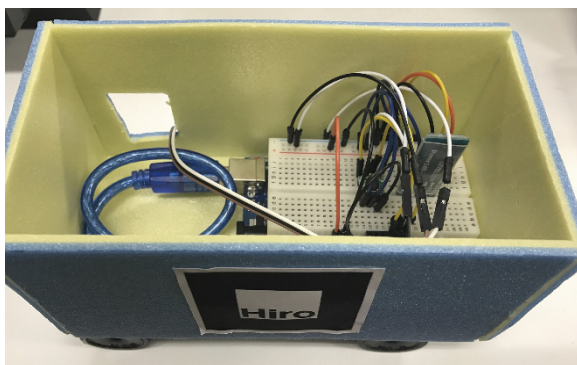


図 6 センサーボックスの内部

を作成した。この側面にはホールセンサーを付与し、タイヤの側面に磁石を取り付けた。センサーボックスでは Bluetooth を用いて加速度センサーなどの値を無線で送信し、PC 側ではその出力値を受信して可視化ソフトウェアを用いてセンサーボックスにかかる力と位置エネルギーおよび運動エネルギーの表示を行う。

AR 表示は Processing と NyAR4psg を用いて開発した。NyAR4psg は ARToolKit の機能を Processing に移植したライブラリである。また、センサーボックスに内蔵された各センサーを制御するために Arduino を使用した。その開発には、Arduino IDE を使用した。

5.3 力と加速度の可視化

力の可視化ではニュートンの第 2 法則である $F = ma$ の数式を使用する (F は力, m は質量, a は加速度)。加速度センサーによって a の値を測定し

て F の値を計算し、図 7 のようにリアルタイムに映像に重畳表示させた。

また、 F を物体の進行方向と物体の垂直方向に分解した力も同時に表示させた。加速度センサーで取得した値を用いてセンサーボックスが傾いた角度の値も計算することができるので、 F の値と角度を計算したことから進行方向の力 $F \sin \theta$ 、垂直方向の力 $F \cos \theta$ の計算も行って表示した。

図 7 のようにカメラを物体に向けることで加速度センサーから物体の現在置かれている場所の傾きを検出し、物体の重力を可視化する。また物体の重力を表示することと同時に力の分解の結果も可視化させる。そして速度や加速度などをリアルタイムで表示させる。

5.4 力学的エネルギーの可視化

力の向きや大きさの可視化だけではなく図 8 のような物体が持つ位置エネルギーと運動エネルギーの可視化も行う。

運動エネルギーは、 $K = mv^2/2$ で求めることができる。今回は、速度を車輪につけたホールセンサーで測定することを試みた。ホールセンサーとは磁気を検出するセンサーであり、タイヤが 1 回転で進む距離に 1 秒間に回転した回数を掛けて距離を求め、さらに速さを求めた。

位置エネルギーは、 $U = mgh$ で求めることができる。高さを求めるために基準水平面に AR マ

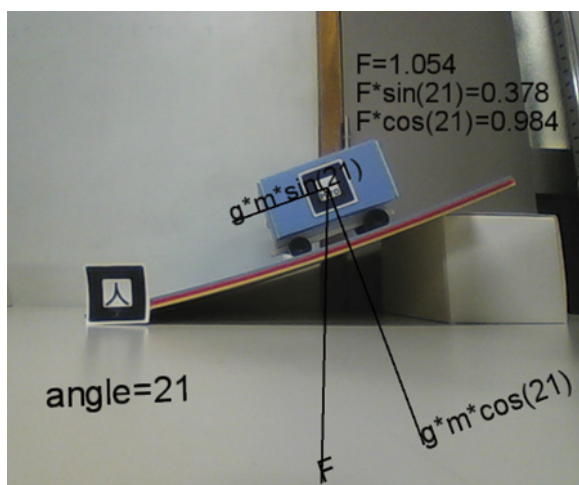


図 7 力の可視化 (力の分解)

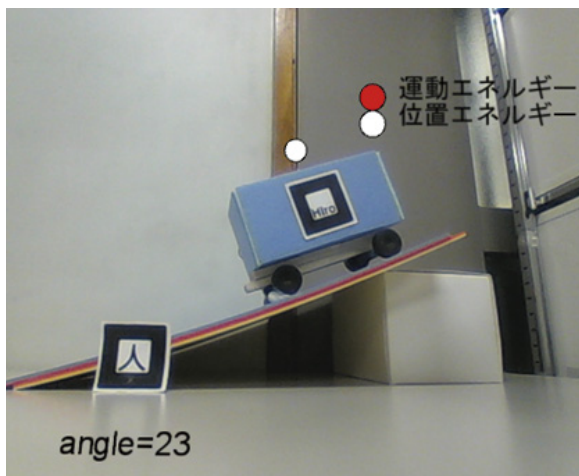


図 8 力学的エネルギーの可視化

ーカーを付与した．そしてセンサーボックスに付与したマーカーと基準水平面に付与したマーカーの座標を取得し，座標を用いて高さを計算した．

エネルギーの可視化は図 8 のように円を用いた．位置エネルギーは白い円，運動エネルギーは赤い円で表し，位置エネルギー，運動エネルギーの値が大きい場合は円も大きく，値が小さい場合は円も小さくなるように可視化を行った．また位置エネルギーは基準水平面より低い位置では負の値になる．そのため基準水平面より低い位置では，位置エネルギーを示す円の色が黒色に変化するようにした．

5.5 現状と今後の課題

現在使用している AR マーカーは，一定以上の速さではカメラ映像にブレが生じてうまく認識されないという問題がある．そこで撮影時のブレに強いマーカー[5]を利用するなどの解決策を検討中である．また，車輪の回転を用いる方法は，安定した速度の測定ができないのも改善すべき点である．力やエネルギーの可視化方法についても，その色や形も含めて情報可視化の技術を応用して改良する必要があると考えている．

今後センサーボックスを小型化して，他のものに貼り付けられるようにすれば，ラジコンの玩具に貼り付けて，それにかかる力やその力学的エネルギーを表示するなど，さまざまな利用の可能性があると考えている．

6. おわりに

本プロジェクトでは，AR 技術を用いて電気・電子回路と力と運動に関する実験を支援するシステムを試作した．前者のシステムでは，回路素子にマーカーを付与することで回路の状態を認識し，測定したデータを画面に合成して表示することができる．後者のシステムでは，加速度センサーを搭載したセンサーボックスにマーカーを付与し，センサーの出力値から計算した力や力学的エネルギーを画面に合成して表示する．

どちらもシステムも課題点が多く，さらに改良・

改善が必要である．今後，改良・改善を進めた上で現実にユーザに実験を行なってもらい，利用した上での評価が必要であると考えている．

本プロジェクトのシステムでは，AR の実現のために現実世界の教育環境をモニタリングできるので，ネットワークを介した通信教育の基礎技術となると考えている．今後これらのシステムに通信機能を実装し，工学教育において実験・実習を遠隔地から指導する技術の開発に発展させていきたい．

謝辞

電気・電子回路実験のシステムの実装と本論文の一部は，2014 年に卒業した花輪裕樹氏（AR 技術を用いた電子回路実験支援システム）および 2016 年に卒業した斉藤飛翔氏（AR と通信を利用した回路実験の学習支援システム）の卒業研究に負うところが大きいので感謝します．

参考文献

- [1] 小松，渡邊，桐生，中野，久保田：AR「凸レンズの働き」教材を使った授業実践の分析，日本科学教育学会研究会研究報告，vol.28, no.3, 2013.
- [2] 伊藤香織，田口宏明，藤波香織：化学実験安全教育システムにおけるメッセージ内容及び定時方法の検討，情報処理学会 第 75 回全国大会講演論文集，2013.
- [3] LightUp : LightUp , <http://www.lightup.io/>, 2013.
- [4] 堂本，足立，梅田，前原：Wii リモコンを用いた力学実験教材の開発，第 27 回理科教育学会支部講演予稿集，2010.
- [5] 有賀，豊浦，茅：動きぶれや焦点ぼけがある画像からでも抽出できる拡張現実マーカーの実現，画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2011) , pp.496-503, 2011.

© 2017 by the Virtual Reality Society of Japan (VRSJ)