

拡張現実技術とソケット通信を用いた遠隔グループ実験可能な仮想電気回路実験環境の構築 Construction of a Virtual Remote Group Experiment Environment of Electric Circuit by Using Augmented Reality Technique and Socket Communication

松浦 高暁[†]
Takaaki Matsuura[†]

石田 文彦[‡]
Fumihiko Ishida[‡]

1. はじめに

著者らは、電気系学科における主要科目の一つである電界回路について、講義や実験の予習、自習に活用できるコンピュータを利用した学習支援システムの開発を目指している。本研究は、拡張現実技術およびインターネット通信を用いて、直感的に操作でき、かつ、複数人による遠隔グループ実験可能な電気回路仮想実験環境の構築を目的とする。

近年、教育方法としてのアクティブラーニング、能動的学修の効果や手法について様々な議論がされている[1]。期待される学修効果を得るために、教員の講義形態、指導手法の変革を求めると同時に、学生も学習への意識を変える必要があり、授業外学習時間の確保や主体的に自ら進んで学ぶ姿勢が重要であるとの指摘がされている[2]。

多くの科目で講義に対応した実験が実施され、座学学習と比して内容や量など限られてくるが、講義で得た知識を実験で経験、確認、活用できるように工夫されている。実験はまた、使用する装置や機器の操作方法や原理を理解し習得でき、複数人でのグループ実験で人との協調性を養うことができる[3]。予習復習など自習において座学講義内容の把握には、教科書を始め、参考書、web など様々なメディアを活用できる。他方、実験については、器具等の準備、環境の確保、教員同伴も含めた安全性の確保といった問題で自習が困難である。講義内容の実験的確認や実験の自習等を行う際、仮想的な実験環境の利用が有用である[4-6]。

本研究は、電気系学科の主要科目である電界回路について、仮想実験環境を構築する。これまでも様々な電気回路シミュレータが提供されている。例えば、簡易電気回路シミュレータ KamiSim [7]や電子回路シミュレータ CircuitViewer [8]は、利用者自らが回路やパラメータ操作などをキーボードやマウスを介して行う。しかし、実際の実験操作とも大きく異なる。また、実際の回路操作に近い LightUp [9]などをはじめ、これらのシミュレータソフトの多くは、端末 1 台での操作を基本としている。2 人以上でのグループ実験での仮想環境の利用を想定すると、端末の前にグループのメンバーが集まるといった利用となる。グループ実験での仮想環境の利用のメリットを活かすには、遠隔でも同じ実験を実施できるのが望ましい。

本研究は、前者に対し、マーカを利用した拡張現実技術を用いた。手によるマーカ操作で実際の実験に近く、かつ、直感的な操作感を与え、学習者の学習意欲や興味を引き立

たせる[10,11]。後者に対し、ソケット通信を用いて、回路パラメータやマーカの情報をネットワークを介して共有し、遠隔でのグループ実験を実施できるようにする。

電気回路実験では、抵抗、コンデンサなどの素子を始め、電源、測定回路等多くの要素を使用する。これらの一つ一つをマーカで対応付けるとマーカ数は膨大になり、通信コストも大きくなることが予想される。本研究では、要素数の増大に伴う使用マーカ数の増大を防ぐため、実験で使用する回路を識別する回路マーカが印刷された実験回路図と汎用の操作マーカを用意した。個々の回路の各要素への操作は回路マーカと操作マーカの位置関係により計算して実行することにより、各要素へ割り当てるマーカをなくした。これに加えて各計器用のプローブマーカなどを用意した。使用マーカ数の増大を軽減することで、遠隔実験を行う際に必要な送信情報の種類を軽減することも期待できる。

本論文では、電気回路実験に不可欠な電圧計、電流計、オシロスコープ機能に加え、抵抗などの値を変えて容易に実験が繰り返せるように操作マーカによる要素値の変更機能を実装した仮想実験環境について報告する。さらに、構築した環境では、ソケット通信を用いてネットワークを介し 2 人での遠隔仮想実験を可能とした。

2. 電気回路仮想実験環境

電気回路実験では、用意された、または、作成した回路に対して、電源電圧、抵抗、コイルやコンデンサの値を適宜変更して、直流および計器を用いた電流、電圧計測、また、オシロスコープを用いた波形観測を行う。

本研究では、インターネットに接続された USB カメラが備え付けられたパソコンに利用者 2 人(Master, Slave とする)での遠隔仮想電気回路実験環境を拡張現実技術とソケット通信を用いて構築した。

使用する機材はパソコン、モニター、USB カメラでそれぞれ、利用者 Master では Dell Optiplex3020(Core(TM)i5-4590 3.30GHz, 8GB メモリ, Windows8.1), DELL P2314(解像度 1920×1080 px²), logicool 社 2.0-MP Webcam C600(解像度 640×480 px²), Slave では、Dell OptiPlex760(Core2Duo 2.8GHz, 4MB メモリ, Windows7), DELL E2009W(解像度 1680×1050 px²), logicool 社 HD Pro Webcam C920(解像度 640×480 px²)を用いた。2 台のパソコンは筆者らの研究室内の離れた場所に設置されており、複数のハブを介してネットワーク接続されている。使用言語は C++ であり、Microsoft Visual Studio 2013 に AR 実装ライブラリ ARToolkit[12]を用いて構築した。

2.1 拡張現実マーカ

構築した仮想実験環境では、回路はあらかじめ用意し、拡張現実マーカを利用して入力する。また、回路値の変更

[†] 国立高等専門学校機構富山高等専門学校専攻科エコデザイン工学専攻 Department of Eco-Design Engineering, National Institute of Technology, Toyama College

[‡] 国立高等専門学校機構富山高等専門学校電気制御システム工学科 Department of Electrical and Control Systems Engineering, National Institute of Technology, Toyama College

や電流電圧計，オシロスコープ操作には別のマーカを利用する。

利用者 2 人(Master, Slave)は，それぞれ USB カメラが備え付けられたパソコン前に座り，回路識別用に回路マーカ(図 1 中の"回路 1"マーカ)が印刷された回路図をカメラに映るように机上に広げる．Master 側カメラで読み取った回路マーカ情報を基に，回路図上の電源位置，抵抗などの素子の位置，配線箇所などが入力される．ただし，入力された回路図に対応する電流，電圧の回路方程式はあらかじめ与えておく．異なる回路ごとに"回路 1"，"回路 2"など異なる回路マーカを用意することで，多数の電気回路に対応できる．

この他，利用者双方に，回路値の変更操作やモニタ表示の切替などに利用する汎用の操作マーカ("操"マーカ)を用意する．"操"マーカを用いた操作を以下にまとめる．

- マーカの回転による回路要素(電源，抵抗，コイル)の値の変更(2.3 節)およびオシロスコープの縦軸横軸レンジ変更(2.5 節)
- 並進移動による直流計と交流系の切替(2.4 節)
- 180 度回転による計器の表示(色と数値)の切替(2.4 節)および時間波形とリサージュ波形の切替(2.5 節)

Master 側利用者には，電流計電圧計の正極，負極，オシロスコープのプロープ，オシロスコープ起動用のマーカを必要に応じて用意する．(表 1)

ビデオフレーム毎に各マーカの座標変換行列(式(1))を計算，保存する．マーカの操作や回路上の位置には，式(1)から，対象マーカの yaw 角回転角(式(2))，並進距離(式(3))を計算し利用する．

$$T = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\theta = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{r_4}{r_1} \right) \quad (2)$$

$$\Delta t = (t_x^0 - t_x^{-1} \quad t_y^0 - t_y^{-1} \quad t_z^0 - t_z^{-1}) \quad (3)$$

座標変換行列中 r は回転成分， t は並進成分を表す．

本仮想実験環境では，回路図上の回路マーカを基準に，対象マーカの相対位置や回転角を求めて，実験の操作を行う．"操"マーカや他のマーカが置かれた回路図上の位置は，あらかじめ入力された素子位置や配線位置を基に計算される．例えば，回路中の抵抗に対して操作を行いたい場合は，対象マーカを回路図中の抵抗からマーカサイズの 2/3 倍の距離以内におくことで抵抗操作と認識される．配線や他の素子についても同様に，マーカサイズの 2/3 倍以内におくことで対象が特定される．なお，本研究で使用したマーカはすべて 3.0cm×3.0cm とした．

2.2 提示情報

モニタには，USB カメラで撮影された回路に重畳して，読み取った回路マーカからの情報を基に回路の各要素の値が表示される．それに加えて，カメラ画像の下に電流計電圧計やオシロスコープに関連する情報が提示される．(図 2)

また，電流計電圧計，オシロスコープで使用するマーカ("P1"，"P2"，"G1"マーカ)が回路の特定の素子や端子位置に

表 1 Master 側利用者のマーカの種類と対応動作

マーカ	動作内容	
P1	電圧電流計	+ 端子
	オシロスコープ	probe
P2	電圧電流計	- 端子
	オシロスコープ	probe
G1	オシロスコープ	ground
O	オシロスコープ機能の起動	

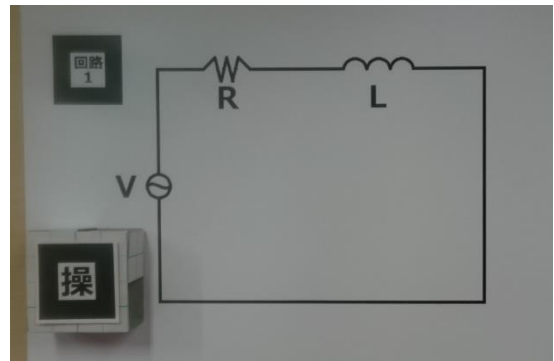


図 1 Master, Slave 側利用者共通する回路マーカ("回路 1")が印刷された回路図と操作用マーカ("操")．

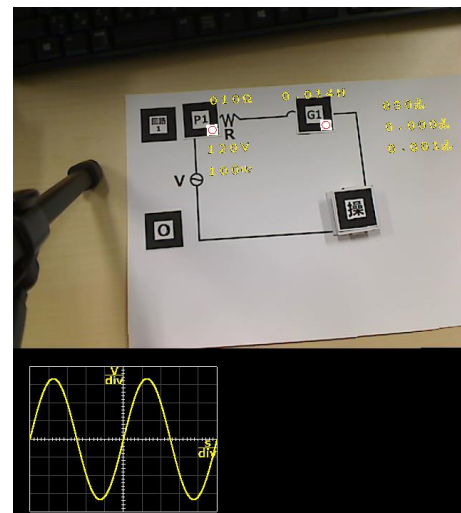


図 2 提示情報の例(オシロスコープ利用時)．

設置できた場合はモニタ上のマークに"○"を、設置されていない場合は"×"をそれぞれ追加表示する。

2.3 回路要素値変更機能

回路中の電源の周波数や抵抗の値を変更する。変更したい回路要素に"操"マークを近づけ操作対象と認識させる。認識されると、"操"マーク上に操作対象要素の単位記号が表示される。その状態で、"操"マークを時計回りに 45 度以上傾けると要素値が上昇し、その後回転角に応じて値が大きくなる。反時計回りでは値が小さくなる。

"操"マークの回転角は、回路マークを基準に、式(2)から回路マークと"操"マークの yaw 角回転角を求め、その差分から計算される。

2.4 電流計電圧計機能

回路中に計器の+、-端子を表す"P1"、"P2"マークを配置し、その点間の直流または交流の電流値もしくは電圧値が表示される。値の表示は、数値もしくは円の塗り潰し色表示とする。色表示は赤を正值、青を負値とし、値が大きいほど色を濃くする。なお、0は白色とする。

電流を測定する場合、配線に直列に"P1""P2"マークを配置する(図 3a)。一方、電圧を測定する場合は、素子に並列にマークを配置する(図 3b)。配線に配置された場合は、マーク上に"○"が重畳され表示される。直流計と交流計の切り替えは"操"マークを横方向に移動させることで行う。現在のビデオフレームと前時刻のビデオフレームでの"操"マークの座標変換行列から並進距離(式(3))を計算し、これが 1 マークサイズ以上であれば、直流、交流の切り替えが行われるとした。直流計または交流計それぞれの場合について、マーク上に"DC"または"AC"を表示させる。

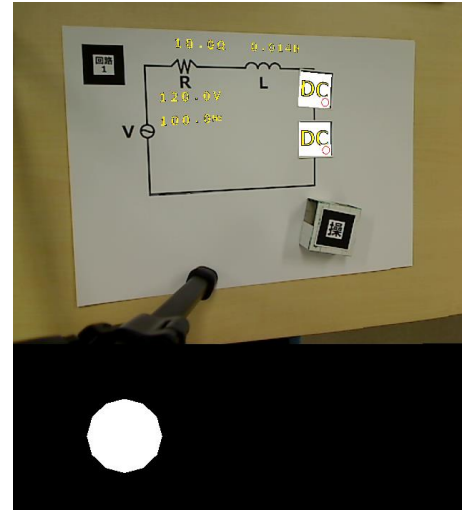
直流計または交流計は、電流もしくは電圧の回路方程式からルンゲクッタ法で数値的に波形を求め、平均値または実効値を計算した。なお、計器の内部抵抗の影響は無視した。

数値表示と色表示の切り替えは、"操"マーク上に何も表示されていない状態、すなわち、要素値変更時ではない時に、回路マークに対し、"操"マークを 180 度回転させることで行う。回転角は 2.3 節の回路値変更の時と同様に回路マークと"操"マークの yaw 角差から計算した。

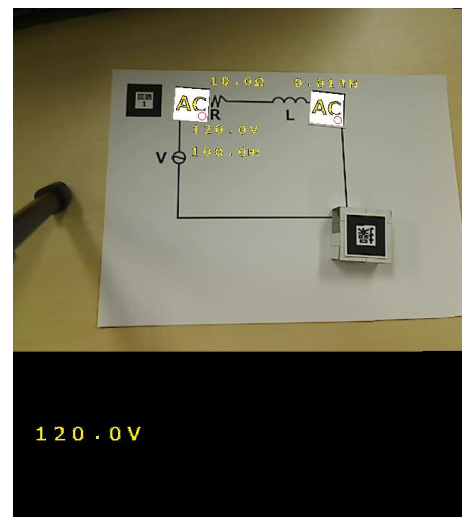
2.5 オシロスコープ機能

"O"マークをカメラで映すとオシロスコープを利用できる。測定したい回路箇所を"G1"マークを GND 端子、"P1"または"P2"マークをプローブとして使用し、回路上に配置する。マークが配線上に配置されると"○"が重畳され表示される。

モニタ下部に電圧波形が表示されるとともに、回路右側にオシロスコープの縦軸、横軸レンジが表示される。レンジの変更は、対象のレンジの表示の横に"操"マークを近づけ、回路要素値変更(2.3 節)と同様の操作で行う。また、"操"マークが回路要素もしくはレンジに対応していない時に、"操"マークを"回路"マークに対し、180 度回転させると、リサージュ波形に切り替わる。元に戻す場合は、もう一度"操"マークを 180 度回転させる。



(a) 直流電流計(色表示)



(b) 交流電圧計(数値表示)

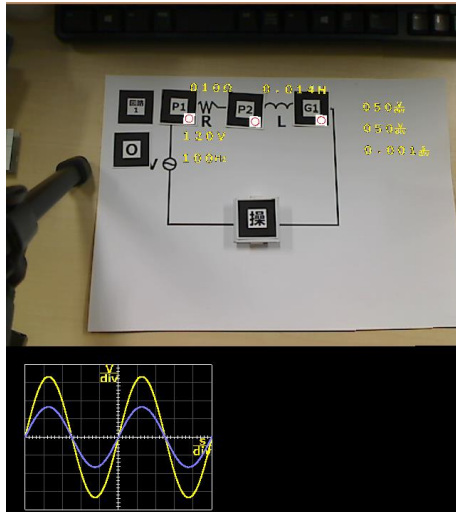
図 3 電流計電圧計機能

2.6 遠隔グループ実験のためのソケット通信による情報共有

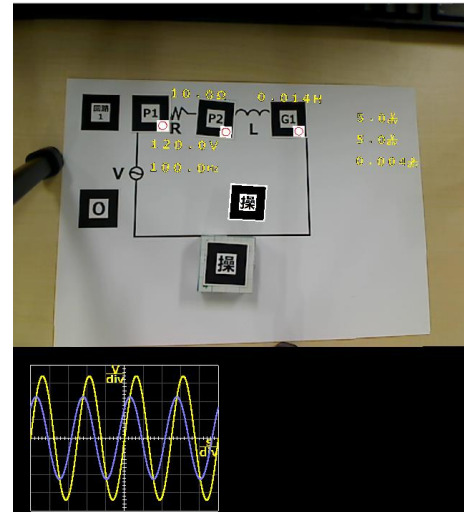
利用者 2 人(Master, Slave)のパソコン間で、ソケット通信を用いてネットワークを介して回路に関する情報を共有し、遠隔仮想実験環境を構築する(図 5)。Master 側は、回路マークが書かれた回路図、"操"マークと表 1 のマークを用いる。一方、Slave 側は、回路マークつきの回路図と"操"マークのみを用いる。

回路方程式を用いた計算は Master 側だけで行う。Master 側から Slave 側へは、カメラ映像、映像内のマークの座標変換行列、回路要素の各値データを送信する。他方、Slave 側では"操"マークの操作に関連する計算のみを行い、Master 側へ、"操"マークの座標変換行列データを送る。

Slave 側でも"操"マークを用いて、Master 側と同様の操作が可能である。ただし、回路の計算は Master 側で実施しているため、Master 側と Slave 側で回路値などの齟齬は生じない。



(a) 電圧波形の出力



(b) リサージュ波形の出力

図 4 オシロスコープ機能の例. 抵抗+コイルと抵抗での電圧降下の測定.

また、データ通信にかかる時間遅れを ARToolkit 内の時間測定関数で、送信時刻と受信時刻の差を取り評価した。本論文で報告する研究室内のネットワークを利用した場合の結果は、平均 0.21 秒、最大で 0.48 秒であった。

3. 仮想実験

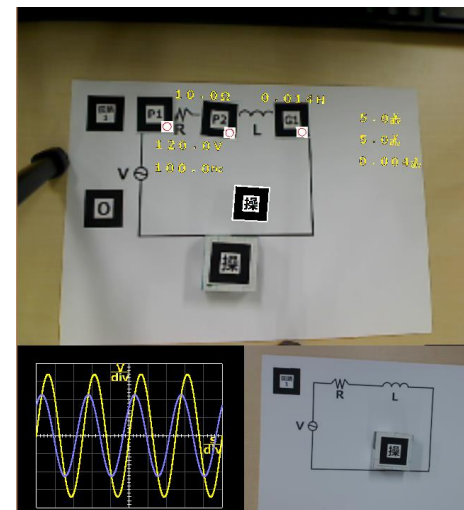
構築した仮想実験環境を用いて仮想実験を行った。実験の予習、自習に活用できるか、マーカを使った操作体系の使いやすさ、通信機能の評価をアンケート調査で予備的にを行った。

3.1 実験条件

実験は実験テキスト[3]に沿ったもの 2 実験とその後に自由操作の実験を行った。実験後にアンケートを実施した。

第 1 の実験は、回路中の抵抗に加わる電圧と回路に流れる電流の値を測定し、抵抗値の計算を行う。実験には直流電源に抵抗を 1 つ接続した回路を使用した(図 6a)。電圧計、電流計機能を使用して、抵抗の値を計算した。実験手順は、

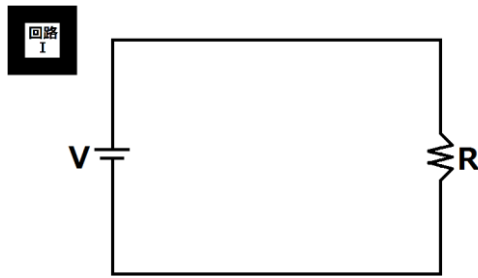
(a) Master 側の提示情報



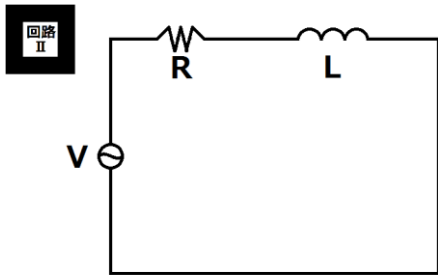
(b) Slave 側の提示情報

図 5 遠隔グループ実験での提示情報の例

1. Slave 側で電圧を 100V に設定する。
2. Master 側で P1, P2 マーカを使って回路の電流と電圧を測る。
3. 抵抗の値を計算して表示されているものと比較する。
第 2 の実験は、回路中の各素子に加わる電圧波形を測定し、電圧と周期と位相の測定を行う。実験には交流電源に抵抗とコイルを 1 つずつ直列に接続した回路を使用した(図 6b)。オシロスコープ機能を使用して電圧波形を出力し、実効値と周期、全体の電圧とコイルに加わる電圧の位相差の測定を行った。手順は、
1. Slave 側で電圧を 100V に設定する。
2. Master 側で P1, G1 マーカを使って、オシロスコープに全体の電圧の波形を出力する。
3. 1 で設定した電圧とオシロスコープ波形から計算した実効値を比較する。
4. オシロスコープ波形の周期の逆数を取り、設定されている周波数と比較する。



(a) 実験 1 用回路



(b) 実験 2 用回路

図 6 仮想実験用回路

5. P1, P2, G1 マーカを使って、全体にかかる電圧とコイルにかかる電圧の波形を出力する。
 6. Slave 側でリサージュ波形に切り替え、全体の電圧とコイルの電圧の位相差を計算する。
- 2 実験の後、自由にマーカを使用し、自由な実験を実施した。

2 実験と自由実験の後、アンケートを記入してもらった。アンケート内容は、各実験についての操作のしやすさと機能のわかりやすさ、実験全体について通信機能は使いやすかったか、実験の予習や演習に本ツールを使用できそうか、自由に触ってみて全体の機能は使いやすかったかを 1(最悪)から 5(最良)の 5 段階評価で評価してもらった。また、数値での評価のほかに、実験についての自由回答を記入してもらった。

実験参加者は筆者の 1 人と電気回路および実験を履修済みの富山高等専門学校電気制御システム工学科 5 年生 3 人で、Master 側と Slave 側をそれぞれ入れ替えて実施した。アンケートは筆者以外の 3 人が記入した。

3.2 実験結果

表 2 にアンケート結果を示す。機能のわかりやすさ、通信機能の使いやすさ、予習や演習への実用性などについては評価が高かった。一方、操作性や機能の使いやすさは評価が低かった。

自由回答では、「各装置の使用方法の復習ができた」「操作が簡単で準備も少ないので良い」「実験前に模擬実験ができ良い予習となる」「回路図上の数値が見えづらい」「回路要素値の変更調整が難しい」などの記述があった。仮想実験環境を利用しての実験に関する予習復習などの学習効果を評価する意見がある一方、情報提示方法、操作

表 2 アンケート結果

アンケート内容		評価		
第 1 実験	操作のしやすさ	3	3	2
	機能のわかりやすさ	5	4	4
第 2 実験	操作のしやすさ	2	2	3
	機能のわかりやすさ	5	3	3
テキストによる実験全体について	通信機能の使いやすさ	3	4	3
	実験の予習や演習に使用できそうか	5	4	3
自由実験	機能全体の使いやすさ	3	2	3

方法などインタフェースの改善を求める意見が挙がった。

4. 考察とまとめ

本研究では、拡張現実技術とソケット通信を用いて、直感的に操作でき、かつ、2 人による遠隔グループ実験可能な電気回路仮想実験環境を構築した。実際の電気回路の実験テキストに倣い仮想実験を行い、操作性や有用性などのアンケート調査を行った。

拡張現実技術を利用した仮想実験環境は、無機化学実験[4]や理科教育素材[5,6]を対象としたシステムが提案されており、直感的な操作感を与え、学習者の学習意欲や興味を引き立てる[10,11]とともに、継続利用による知識獲得効果[4]が報告されている。アンケート結果から、本研究の仮想実験環境では予習や演習などに使用可能という評価を得ているが、継続して使用してのスコア追跡などで定量的に効果を測る必要がある。

また、遠隔グループ実験のために導入したネットワークを介しての情報共有について、研究室内のネットワーク環境下では時間遅れが最大でも 0.5 秒程度である。本実験では、この程度の時間遅れは利用者にとって影響が殆ど無いことが伺われる。

しかしながら、全体的な操作性の悪さがアンケートで指摘されている。原因として、マーカ自体が隠ぺいに弱く、操作の際に手で隠れてしまうことがあるということや、マーカの誤認識による誤作動が起きる可能性があるということが挙げられる。これらの改善案として、マーカの改善が挙げられる。隠ぺいへの弱さやマーカの認識精度に対して、対策用のマーカ[13,14]が開発されており、これらのマーカを使用することによって操作性についての問題は改善できる可能性がある。また、マーカ以外にも文字の色や各素子の位置、パラメータの変化量などといった問題点も挙げられた。これらの解決のためには繰り返し試用を行い、より利用者にとって不自由のない操作性を目指す必要がある。

拡張現実技術は視覚提示だけではなく、聴覚[15]や触覚[16]、嗅覚、味覚[17]などの提示も利用できる。拡張現実技術を用いた学習支援システムの多くは、視覚による情報提示が用いられる。他の感覚の利用により仮想実験環境にリアリティを与え学習効果や利用者への興味の持続効果がさらに高まる可能性がある。例えば、電気回路においては長時間の大電流通電による抵抗の温度上昇をマーカの発熱

や匂いなどで知らせることにより、現実に近い状況が仮想的に再現でき、魅力ある学習支援システムが期待できる。

参考文献

- [1] 新たな未来を築くための大学教育の質的転換に向けて～生涯学び続け、主体的に考える力を育成する大学へ～，中央教育審議会答申(2012).
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo0/toushin/1325047.htm
- [2] Chickering, A. W., & Gamson, Z. F.: Seven principles for good practice in undergraduate education. AAHE Bulletin (1987).
- [3] 南谷春之, 電気・電子工学実習, 臨床工学シリーズ 20, コロナ社(2001).
- [4] 岡本勝, 隅田竜矢, 松原行宏, "拡張現実型マーカを用いた無機化学学習支援システム," 電子情報通信学会論文誌 D vol.J98-D, no.1, pp.83-93 (2015).
- [5] 沖見圭洋, 松原行宏, "拡張現実型マーカを用いた滑車配置実験のための学習支援システム," 日本教育工学会論文誌, vol. 37, no.2, pp.107-116 (2013).
- [6] 岡本勝, 岩崎雪路, 松原行宏, "仮想環境における双腕型剛体操作インタフェースを用いた体験型力学学習支援システムの開発," 教育システム情報学会誌, vol.30, no.1, pp.92-97 (2013).
- [7] 簡易電気回路シミュレータ KamiSim
http://hp.vector.co.jp/authors/VA004101/kamisim/j_kamisim.htm
- [8] 電子回路シミュレータ CircuitViewer
<http://www.micronet.co.jp/cv/>
- [9] LightUp <http://www.lightup.io/>
- [10] 浅井紀久夫, 近藤智嗣, 小林秀明, 水木玲, 有田寛之, "拡張現実感を利用した月面探索システム:科学博物館でのデモ展示とその評価(VR技術の教育利用/一般)," 電子情報通信学会技術研究報告. ET, 教育工学 107(391), 63-68 (2007).
- [11] 森田裕介, 藤島宏彰, 瀬戸崎典夫, 岩崎勤, "デジタル教材を重量提示する天体学習用 AR テキストの開発と評価," 日本教育工学会論文誌 35(Suppl.), pp.81-84 (2011).
- [12] 加藤博一, "拡張現実感システム構築ツール ARToolKit の開発," 電子情報通信学会技術研究報告パターン認識・メディア理解 vol. 101(652), pp.79-86 (2002).
- [13] 田中秀幸, 角保志, 松本吉央, "LentiMark: レンチキュラーレンズを用いた高精度な姿勢推定のための視覚マーカ," 信学論(D), vol.J95-D, no.8, pp. 1522-1529 (2012).
- [14] H. Tanaka, Y. Sumi, and Y. Matsumoto, "A high-accuracy visual marker based on a microlens array," Proceedings of The 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012), pp.4192-4197 (2012).
- [15] 聴覚 AR システム「聞こ AR」
<http://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000137.000004714.html>
- [16] 野嶋琢也, 関口大陸, 稲見昌彦, 舘暲, "力覚提示を利用した実時間実環境作業支援システムの提案," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.7, no.2, pp193-199 (2002).
- [17] 鳴海拓志, 谷川智洋, 梶波崇, 廣瀬通孝, "メタクッキー: 感覚間相互作用を用いた味覚ディスプレイの検討," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.15 no.4, pp.579-588 (2010).