

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 29 日現在

機関番号：53301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24501076

研究課題名(和文) 立体視アニメーションと電子線制御による時間領域を含む電磁気学3次元可視的教育

研究課題名(英文) Web-based interactive 3D electromagnetic visualization for education

研究代表者

山田 悟 (YAMADA, Satoru)

石川工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：40249777

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：高等専門学校・大学の電気電子系の学科において、電磁気学はその根幹をなす学問でありながら、その修得が非常に困難であると言われている。その理由は電磁気学では、その基本法則である「マクスウェルの方程式」が電界と磁界との3次元的な時間領域の相互作用をともなうために、ニュートンの運動方程式のようにある程度の直感的な理解ができないためである。理解を助けるために、ツールとして電磁界シミュレーションがあるが、専用のアプリケーションであることが多い。本研究で、Webブラウザで動作する電磁気学シミュレーションコンテンツを作成し、時間領域を考慮した電磁気学視的教育システムを行い、教育への実践を行った。

研究成果の概要(英文)：In the electrical and electronic systems of the Department of technical colleges and universities, electromagnetism is the foundation courses. But for beginners, the acquisition is said to be very difficult. The reasons that the basic law for electromagnetism, "Maxwell's equation" is accompanied by a three-dimensional interaction of the time domain of the electric and magnetic fields. Electromagnetic field are commonly visualized in 2D graphics for teaching. Existing software are often proprietary and lack of interactive navigation capability for web users. A direct web-based visualization system with real-time interactive rendering capability can benefit EM education. This study demonstrates a pilot HTML5 deployment using WebGL-based browser with 3D graphics rendering power for electromagnetic data visualization.

研究分野：電子デバイス

キーワード：科学教育 シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

高等専門学校・大学の電気電子系の学科において、電磁気学はその根幹をなす学問でありながら、その修得が非常に困難であると言われている。その理由は電磁気学では、その基本法則である「マクスウェルの方程式」が電界と磁界との3次元的時間領域の相互作用をとまなうために、ニュートンの運動方程式のようにある程度の直感的な理解ができないためである。理解を助けるために、ツールとして電磁界シミュレーションがあるが、専用のアプリケーションであることが多い。

本研究の目的は、Webブラウザで動作する電磁気学シミュレーションコンテンツを作成し、時間領域を考慮した電磁気学視的教育システムを開発することである。

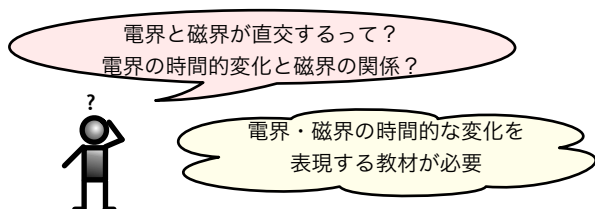


図1 電磁気学教育の問題点

2. 研究の目的

電磁気学は、電気電子系分野における非常に重要な基礎科目の1つとして位置づけられている。特に近年では、電子機器の動作周波数の高周波化や光デバイスの普及にともなって、その振る舞いを記述する電磁気学の重要性が増している。しかし、教授する立場としては現状をながめると、学生が電磁気学を完全に理解するにいたるまでには、非常に多くの問題があると判断される。

その理由は、電磁気学では、電磁気学の基本法則である「マクスウェルの方程式」が電界と磁界との3次元的時間領域の相互作用をとまなうために、ニュートンの運動方程式のようにある程度の直感的な理解ができない。さらには三次元ベクトル解析や時間をとまなう微分方程式などの数学的知識や基礎物理学の知識基盤の上に成立しており、初学者にとって学習困難となっているためである。

また、力学がボールや坂といった目に見えるもの、触れられるものを対象としているのに対して、電磁気学では影響を受ける電子やイオンなど荷電粒子、電界、磁界が目に見えない、存在そのものを実感として感じられないものであることが、理解を妨げる原因となっている。

一般に学習の理解を補助する方法として、プレゼンテーションソフトを用いた図解や法則を検証する実験の演示などが有効な方法としてあげられる。

しかし電磁現象はマクスウェルの方程式を基礎におく時間領域をとまなう3次元の相互作用であるために、図示することが非常に困難である。

本研究の目的は、電磁気学の学習を補助する時間領域を考慮したWebブラウザで動作する教育補助コンテンツを構築することである。特に、電磁気学は3次元+時間次元の4次元であることを考慮し、電磁界シミュレーションをアニメーションとして表示できるようにした。コンテンツはシステム上の制約がない限りは、スマートフォンやタブレットデバイスでも動作するものとした。

3. 研究の方法

コンピューターシミュレーションの結果を可視化するシステムを構築するためには、「データの入力」、「演算」、「可視化」、「データの保存」を行うことが必要となる。ただし、可視化のみを目的とする場合は、「データの保存」は必須ではない。一般に、さまざまなプラットフォームでシステムを構築する場合、シミュレーションのコアとなる「演算」は、プラットフォームに依存しないが、「データの入力」および「可視化」は強くそのプラットフォームに依存する。JavaやFlashを利用すれば、プラットフォームの違いを排除できるが、その一方でセキュリティの観点から、JavaやFlashの実行を制限している場合もみられる。また、スマートフォンやタブレット型デバイスを考慮すると、JavaやFlashは動作にかなりの制限が発生する。



図2 開発システムの構成

こうした問題を解決するために、今回作成するコンテンツはWebブラウザで動作するものをHTML5+JavaScriptで開発することとした。HTML5は、HTMLの改訂版であり、これまでのHTMLに加えてcanvas要素と言われる動的な画像の描画のための要素がサポートされている。HTML5は、Chrome, Safari, Firefox, Internet Explorerなど主要Webブラウザの最新バージョンではすべてサポートされており、2次元の描画であれば、ほぼすべてのプラットフォームで動作する。

3次元コンテンツについては、WebGL⁽¹⁾を用いた。WebGLは、ウェブブラウザで3次元グラフィックを表示させるための規格であり、HTML5のCanvas要

素を用いる。WebGL は、PCにおいては、Firefox, Chrome, Safariでサポートされており、特別な環境を用意せずとも動作する。スマートフォン、タブレット型デバイスでは、iOS搭載機は動作しないが、Androidの一部バージョンではその動作を確認した。

4. 研究成果

(1) 作製した電磁気学学習コンテンツ

① 静電界学習用コンテンツ

静電界は、電磁気学学習において、導入部分に位置づけられる。時間的な変動のない静電界は、図示もしやすい。その一方で電界は、地球表面の重力場と異なり、一様でないために混乱する学生も存在する。また、ポテンシャルエネルギーについても同様で、高さがそのままポテンシャルエネルギーの大きさに反映される地球表面の重力場と異なり、電位は直感的な理解が困難である。そのために、さまざまな場合において、任意の点の電界や電位を図示できるコンテンツは重要である。

図3に静電界のシミュレーションコンテンツの一例を示す。ここでは、2つの電荷が任意の点に作る電界を表示させている。数学においてベクトル解析を学習し始めた学生は、力や電界の合成をベクトルの合成としてではなく、平行四辺形の作図ととらえてしまい、誤った結果を導き出してしまうことも多い。作成したコンテンツを利用することにより、定性的な理解が促進される。その他にポアソン方程式による電位、電界シミュレーションなどを作成した。

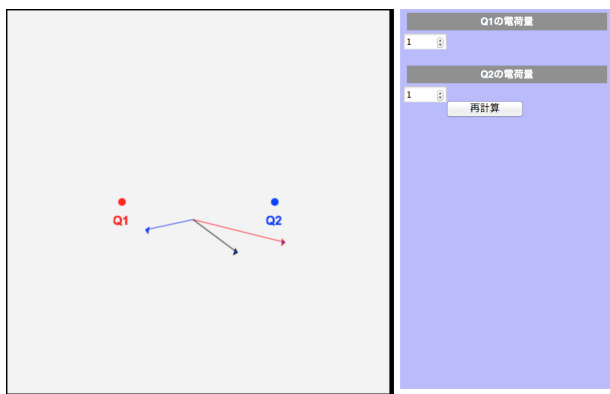


図3 2つの電荷が作る電界

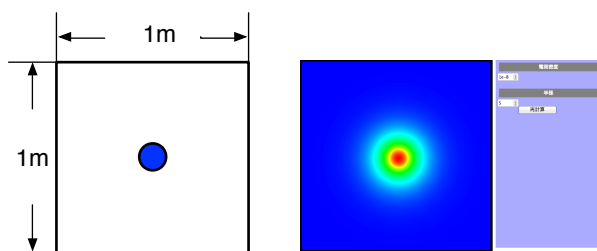


図4 ポアソン方程式による円状電荷が作る電位シミュレーション

② 電流と磁界学習用コンテンツ

小中学校で磁界について学ぶときに、永久磁石を題材とするために、無意識に磁極の存在を意識する。そのために、磁界を学ぶときに、どうしても磁極の意識が強くなり、電流が磁界を作るということが、直感的に理解できていないケースが見られる。また、教授する立場からすると、電流が磁界をつくるという図を板書するときに、3次元的な図をうまく描けず苦勞するケースが多い。

また、電磁誘導は電流や磁界の時間変動が重要であるが、それを表現するのは困難である。

今回は、これらを考慮したコンテンツを作成した。

③ 電磁波シミュレーションコンテンツ

FDTD法を用いて電磁界シミュレーションコンテンツを作成した⁽²⁾。境界条件は、動作速度を重視し、Murの1次吸収境界を利用した。図5にシミュレーションによって求めた電界分布を示す。電界が時間発展とともに、シミュレーションでは、任意の位置に誘電体を配置することが可能であり、電磁波の誘電体境界における透過、反射、屈折が確認できる。このようなコンテンツを利用することにより、電磁界の相互作用の理解が促進されると思われる。

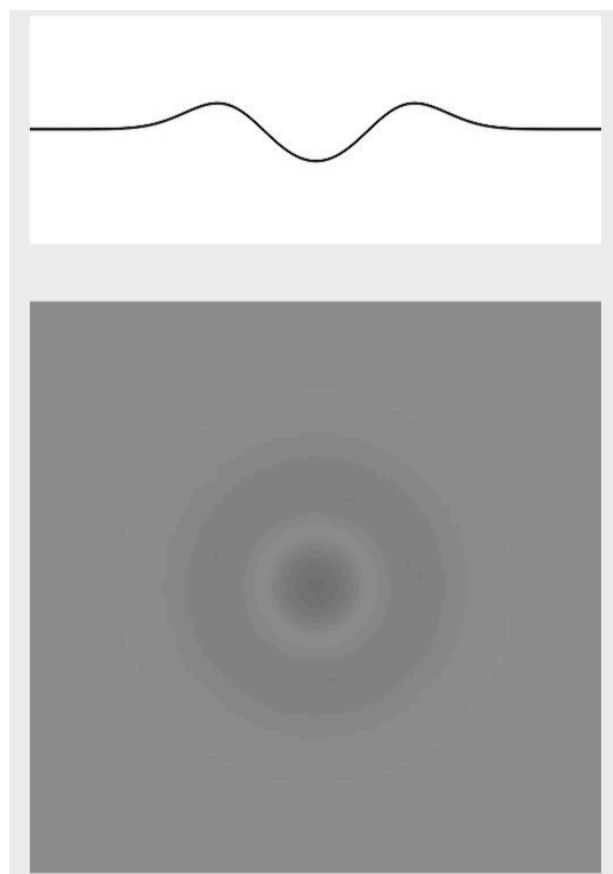


図5 FDTD法による電磁界シミュレーション

(2) コンテンツの動作時間評価

電磁界シミュレーションは、その動作に記憶容量や計算負荷が高いことが知られている。今回作製したコンテンツはすべてWebブラウザで動作させるものであり、その実行はサーバではなく、ユーザの

利用する端末上で行われる。すなわち、その動作速度は、ユーザの端末の性能により決定される。そこで、さまざまな実行環境において、作製した電磁気学シミュレーションコンテンツの実行速度となるかを評価した。評価したコンテンツは図3から図5に示したコンテンツであり、実行環境はPC(Mac mini 2011)、タブレット端末(iPad mini retina)、スマートフォン(iPhone 5S)とした。

まず、図3に示した2つ電荷が作る電界についてその実行時間の評価を行った。このシミュレーションにおいては、計算は非常に単純な実数演算のみであり、どの環境で実行した場合でも有意な差は見られなかった。

次に、ポアソンの方程式から任意の点の電位分布を求めるシミュレーションプログラムの検証を行った。これは、 256×256 の領域で連立1次元方程式をガウスザイデル法で解くものであり、 10^6 回程程度の浮動小数点演算が必要であり、コンピュータの計算能力がそのまま反映されると考えられる。

シミュレーションプログラムは、HTML5 と Javascript によるものとProcessing.jsを用いたものについて行った。表1 および 図6に各環境における実行時間を示す。

表1 各環境における実行時間 (単位 秒)

	Mac mini	iPad mini retina	iPhone 5S
HTML5+JavaScript	15.874	43.773	43.474
Processing.js	16.781	48.013	47.659

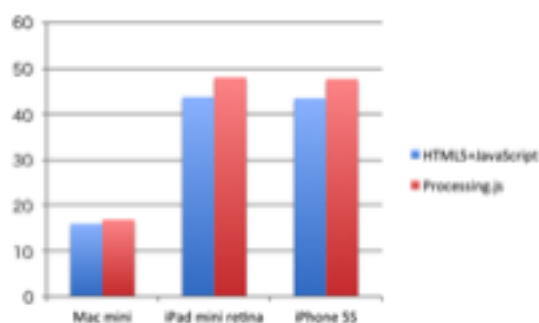


図6 各環境における実行時間比較

この結果より、PCとタブレット端末やスマートフォンなどの携帯情報端末とは3倍程度動作時間に差があることがわかる。また、タブレット端末とスマートフォンでは、その動作時間に差がないことが確認される。このことから、シミュレーションでは、搭載されているプロセッサにより、その実行時間がほぼ決定されることが示唆される。

このシミュレーションでは、PCにおいてもその実行時間が約16秒であり、教育コンテンツとしては実用に耐えない。そこで、シミュレーションの厳密性を犠牲にし、計算領域を 128×128 としたところ、どの環境においても実行時間は5秒以下となり、十分実用に耐えうることがわかった。

さらに図5のFDTD法による電磁界シミュレーションを各環境において行ったところ、どの環境においてもほぼリアルタイムでアニメーションが行えることを確認した。

(3) 学生によるコンテンツの評価

今回作製した電磁界シミュレーションコンテンツを、電磁気学の初学者である本校電気工学科3年生に試用させ、アンケートを実施した。

まず、このようなコンテンツを利用することにより、電磁気学理解の参考になったかを聞いたところ、約98%の学生が参考になったと回答した。自由記述の意見では、「電界の重ね合わせによる合成の意味が初めて分かった。」「ポアソンの方程式の応用がよくわかった。」「アニメーションで電磁界の動きが確認でき、電磁気は波が重要だということや他の授業で学んだ平面波とは何かがわかった。」「電界とか電位って空間に分布するんだってことが今わかった。」などがあつた。この結果より、やはり電磁気学において可視化することがその理解を促進することが確認できた。また、学生にとっては、数式の上では解けていても実感を伴っていなかった「わかった」という感覚がこうしたコンテンツにより体験できることも分かった。

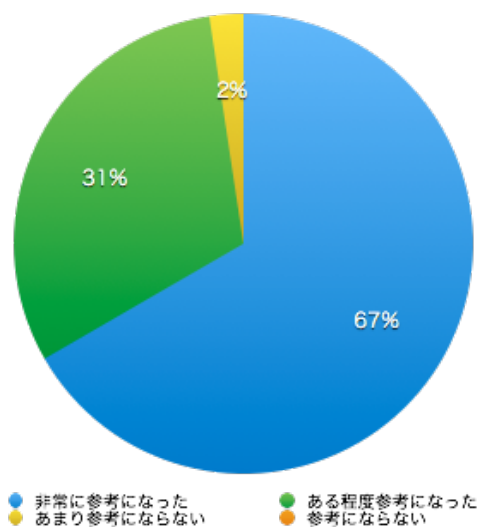


図7 電磁気理解のための参考になったか

次に、このようなコンテンツを今後も利用したいかを聞いたところ100%の学生が利用したいと回答した。自由記述の意見では、「授業では電界と電位の違いがよくわからないが、こうしたものがあればすぐわかったと思う。」「もっとコンテンツが充実されたら使いたい。それに今学んでいることで、このようなシミュレーションが出来るということに感動した。」「電磁気だけじゃなく電気のすべての科目に用意してほしい。特に電気回路の交流はよくわからない。」「数式を自由に入れさせてほしい。」「3次元の球電荷とか無限長導線とか実はよくわかっていないので、そういうものを表示できるようにしてほしい。」

などがあった。学生にとって、電磁気学や電気回路など、目に見えない現象を扱う講義は、理解できたと実感できることが少ない。こうしたコンテンツの利用により、学生自らが自信を持って知識の定着を実感できると思われる。

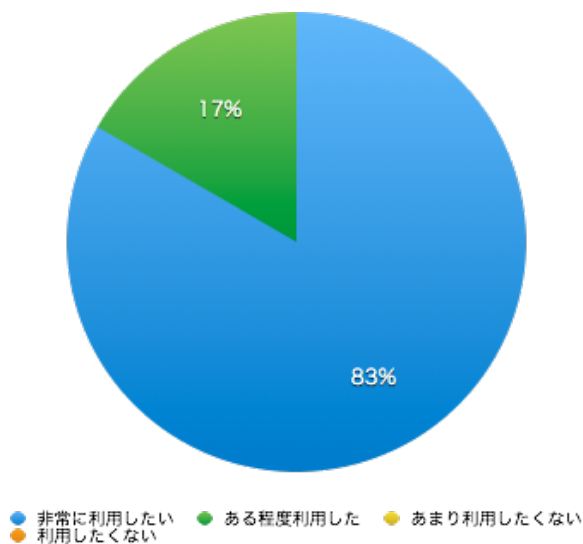


図8 このようなコンテンツを利用したいか

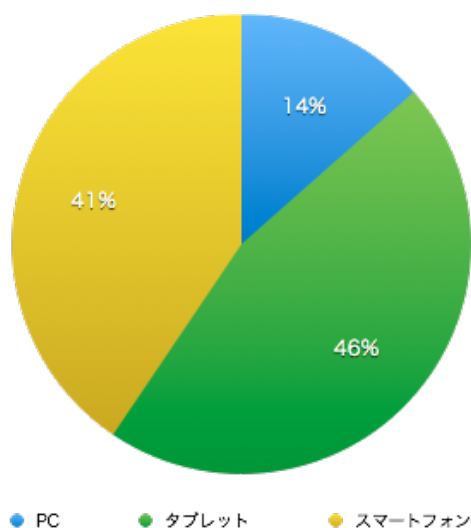


図9 どの環境で利用したいか

最後に、こうしたコンテンツをPC、タブレット、スマートフォンのどれで利用したいかを調査した。この結果、タブレットとスマートフォンはほぼ同一であり、あわせて86%の学生が携帯情報端末での利用を行いたいと回答した。その理由は、「演習室のような環境だったらPCでもいいけれど、すぐ使えるスマートフォンの方がいい。」「PCだと他の画面が見えてしまうけど、タブレットやスマートフォンなら全画面になるから集中できる。」「スマートフォンだと画面が小さい。」であった。学生にとっては、PCは閲

覧端末ではなく、作業を行う端末であり、こうしたコンテンツを利用するにあたっては、携帯情報端末の方が適していると考えられる。

最後に、3次元の電磁界シミュレーションプログラムを試用させ、それについての感想を聞いたところ、「電流と磁界の関係がわかった。」「外積の向きや回転がわかった。」という好意的な意見の一方で「画面が小さいとよくわからない。」「視点を変更している間によくわからなくなった。」「動作が遅い。」という意見も多かった。3次元空間での自由なシミュレーションでは、メモリの制約により、かなり荒い分割数でのシミュレーションになることや、次元を増加させることにより、指数関数的に演算回数が増加することによる速度低下が問題となるために、Webベースでのコンテンツ開発には依然として問題があることがわかった。

(4) まとめと今後の展望

Webブラウザで動作する電磁気学教育コンテンツを作成した。コンテンツは、2次元コンテンツについては、PC、スマートフォン、タブレット端末で動作し、3次元コンテンツについては、PCとスマートフォン、タブレットPCの一部について動作した。

近年ではPCの動作速度の向上に比較して、タブレット、スマートフォンに代表される携帯情報端末の速度向上はめざましい。また、携帯情報端末のグラフィック描画性能はPCと同等、その緻密さはPCを超えている。さらに、スマートフォンの画面面積の増加も進んでおり、こうした携帯情報端末をターゲットとする教育コンテンツの開発はより一層加速すると考えられる。

また2014年に、iPad、iPhoneのOSであるiOS8において、WebGLが標準でサポートされることとなり、Webコンテンツでの3次元サポートがより一層容易になる。WebGLは、グラフィック描画をサポートするハードウェアGPUを積極的に活用するものであり、描画性能の向上が見込まれる。

現在の若年層、特に小学生世代はいわゆるデジタルネイティブ世代と言われており、こうした携帯情報端末を利用した教材の重要性が増加すると思われる。本研究の成果は今後のWebベースのコンテンツ開発に活かされると考えている。

<参考文献>

- 1) WebGL - OpenGL ES for the Web
<<http://www.khronos.org/webgl/>>
- 2) 宇野享, FDTD法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社
5. 主な発表論文等
[学会発表] (2件)
- ① 山田 悟, 瀬戸 悟 Webブラウザを利用した電磁気学教育コンテンツの作成, 全国高専教育フォーラム, 2014.8.27, (石川県・金沢市)
- ② 山田 悟, 金寺 登, 阿蘇和寿, 数学活用大事

典---システム構築上の工夫について, 全国高専
教育フォーラム, 2014.8.27, (石川県・金沢市)

[その他]

ホームページ

<http://boron.e.ishikawa-nct.ac.jp>

6. 研究組織

[研究代表者]

山田 悟(YAMADA, Satoru)

石川工業高等専門学校 其他部局等・准教授

研究者番号：40249777