

動的グラフを用いた自宅学習のための Web コンテンツ作成

柳田康幸^{†1}

対面講義が行えずリモートでテキスト中心の講義を行わざるを得ない状況の中、自宅からの学習に少しでも能動的要素を持たせるため、学習内容に対応した動くグラフのコンテンツを作成した。パラメータを変えるとリアルタイムでグラフが動くことにより、教科書に記載されている静的なグラフや数式を補足し、理解促進をサポートする。専用のソフトウェアを導入しなくてもモダン Web ブラウザさえあればどこでも学習できるよう、HTML と JavaScript によるフロントエンドでの実装を行った。

Web-based interactive educational materials for home schooling using dynamic plots

YASUYUKI YANAGIDA^{†1}

In 2020, we faced the situation that we cannot provide face-to-face lectures and were advised to give text-based lectures remotely. In order to enhance the active property in learning from home, I created web materials of dynamic plot corresponding to the learning content. By changing the parameters using GUI, the plot changes in real time to complement the static plots and mathematical equations described in the textbook and thus supporting the promotion of understanding. We implemented these materials based on HTML and JavaScript so that students can study anywhere using a modern web browser without introducing dedicated software.

1. はじめに

2020年度前期は、コロナウイルス感染拡大防止対策が全世界における喫緊の課題となり、大学の講義も遠隔実施を余儀なくされた。遠隔講義では、ビデオ会議ソフトウェアによるリアルタイム講義や、ビデオ録画による講義配信が行われることが多い。筆者の勤務校においては、オンライン授業用のシステムが以前より運用されており一部の講義で利用されていたが、今回の対策では全学の全講義約2700クラスと、桁違いの規模へ対象を拡大することになった。加えて、極めて早急な授業実施体制構築が必要であったため、リアルタイムオンライン講義のための回線増強や、ビデオ配信のためのサーバ容量増強が間に合わないこと、またインターネット接続の通信量に上限がある学生への配慮が必要であることなどから、原則として静的媒体を中心とした講義実施が大学から要請された。

静的媒体による講義資料として、筆者は以前より講義資料を PowerPoint スライド形式の PDF ファイルにして事前に学生へ配布しており、そのままオンライン講義の資料とすることは可能であった。しかしながら、動画の視聴に馴染んだ世代の学生に静的な資料の熟読を課すだけでは学習意欲維持に大きな精神的負担を要求することになり、対面講義と同等の効果を得ることは難しいと思われた。一方、静的媒体使用の要請が、ネットワーク通信量に関する懸念から来るものであるならば、これに抵触しない形であれば問題ないと考えられる。そこで、教材の取得に必要な通信量を抑制しつつ、教科書や講義資料に記載してある図表に

能動的要素を取り込み、理解の促進を図ることとした。本稿では、筆者の担当科目内容に合わせて作成したいくつかの教材について報告する。

2. 手段の選択

動画を使わず動的な教材を提供するため、また学習者の能動的な姿勢を引き出すためには、学習者がただ教材を眺めるだけではなく何らかの操作を行い、その結果のフィードバックを小気味よいタイミングで得ることが効果的と考えられる。能動的な操作に対する間髪を入れないフィードバックは、人にとって（あるいは他の動物にとっても）一種の快感をもたらす。ボタンを押すと音が鳴る乳幼児向けのおもちゃなどはその典型である。小気味よいレスポンスは大人になっても心地よいものであり、エンタテインメントにおいてもキー要素の一つと考えられる。

このような機能を実現する教材の提供は、アクティブラーニングの一形態と解釈することも可能であるが、一般的な教育論として語るには、本報告の内容はあまりに限定的である。このため、以下はあくまで筆者の担当科目である、電気電子回路、デジタル信号処理、バーチャルリアリティに関して適用したケーススタディとして報告する。

上記の担当科目では、原理的な説明のため数式が多用される。数式における変数の対応関係を可視化するグラフは有用であり、これらの科目、特に分野としての歴史がある回路や信号処理の分野の教科書には多数のグラフが掲載されている。数式には多数のパラメータが関与することが少なくないが、紙面上で表現できる2次元グラフは2変数の

^{†1} 名城大学
Meijo University

関係のみであり、他のパラメータは固定されている。より包括的な理解を促すため、主要な2変数の関係をグラフで示しつつ、他のパラメータを動かすとグラフがどのように変化するかを学習者自らの操作により体験する教材を提供することにした。

筆者はこれまでもこれに類する教材を少数ながら制作しており、自作のプログラムを実行して対面講義中に見せたり、Microsoft Excel のファイルを配布したり、MATLAB, Scilab などのソフトウェアを利用してパラメータを動かしたときの様子を対面講義で見せたりすることを講義に採り入れてきた。特に MATLAB [1], Scilab [2] などは非常に少ないコードでグラフを作成可能で、教材の開発効率が高い。しかし、学習者はこれらの科目に関係する分野を必ずしも専門にするとに限らず、これらのソフトウェアのインストールを要求することは敷居を高くすることになりかねない。

今回の遠隔講義において、学習者は大学が提供する Web ベースの学習システムを利用しており、資料は Web ブラウザ上に表示される。この環境とシームレスな動的教材を提供すれば、資料閲覧のために特別な準備作業を要求せずに済み、閲覧効率も上がるのではないかと考えた。そこで、HTML と JavaScript [3] による動的ページを作成し、Web サーバ上で補助資料として提供した。昨今、情報工学科の学生であっても、入学時には高校における情報の授業以外で PC を触った経験がない学生も増えてきているが、Web ブラウザはスマートフォン、タブレットにも標準で備わっており、加えてソフトウェアアップデートにより最新のブラウザがインストールされている確率が高い。JavaScript は、古い Web ブラウザには実装されていない機能も少なくないが、学生の Web 閲覧環境を考えると、JavaScript が動作するモダンブラウザを利用している確率は極めて高いと思われる。

3. 作成した教材

単純な教材から、ある程度専門的な内容に関する教材まで、講義の説明を補足するための教材を十数種類ほど制作した。2020年4月から8月の間に作成した教材の一覧を表1に示す。以下、それぞれの内容について紹介する。なお、一連の教材は筆者の研究室 Web サーバ[4]で公開している。

3.1 基礎数学

電気電子回路や信号処理を学ぶ上で、複素数の概念は非常に重要である。しかしながら、年次が浅い学生の中には、複素平面のイメージが定着しておらず、振幅や偏角(位相)の計算を行うとき、複素数の商の形式でも杓子定規に分母を実数化して実部と虚部に分離し計算しようとする学生が少なくない。複素数の商の絶対値と位相の計算を効率よく行うにあたり、まず2つの複素数の積において、積の絶対値はそれぞれの絶対値の積であり、積の偏角はそれぞれの

表 1 作成した教材一覧

Table 1 List of educational materials

分野	教材タイトル
基礎数学	複素数の積の図形的解釈 (GeoGebra サイトを利用)
	正弦波の振幅, 周波数, 位相
	指数関数の観察範囲と形状
電気電子回路	ダイオードの微分抵抗
	バイポーラトランジスタの動作
	FM 変調のスペクトル
デジタル 信号処理	正弦波信号のサンプリング
	離散時間正弦波の周波数に関する周期性
	離散時間畳み込みの式における時間シフトと反転
	短い離散時間信号の離散時間フーリエ変換(DTFT)
	一般化 hamming 窓の係数と形状
	正弦波信号の DFT によるスペクトル: 窓関数の形状と裾野
バーチャル リアリティ	零点・局の配置と周波数特性 ・1次 ARMA システムの場合 ・2次 ARMA システムの場合
	HMD 使用時の遅延による世界揺れ
	HMD の視野角不整合による世界変形
	HMD の瞳孔間距離不整合による世界変形 大型スクリーン利用時に頭部運動非対応の場合の世界変形

偏角の和であることを直感的に会得していることは重要である。これらの関係を相似図形により説明する教材を作成した。この教材に関しては、公開されているサービス GeoGebra [5] を利用した。

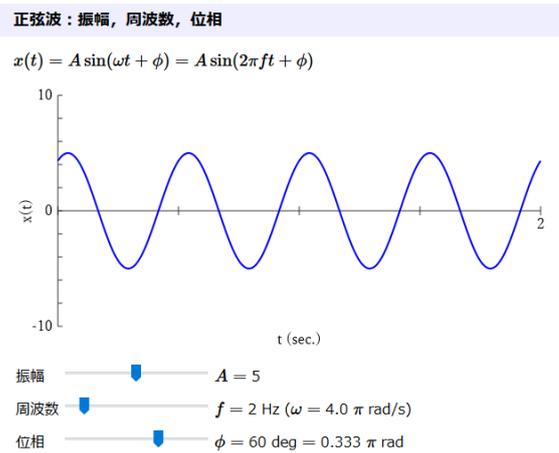


図 1 教材：正弦波の振幅, 周波数, 位相

Figure 1 Example of material: amplitude, frequency, and phase of sine wave.

電気電子回路や信号処理において、正弦波は重要な基本的信号であり、頭の中に波形のイメージを作っておくことが望ましい。しかし、特に位相が進む・遅れることに関しては、数式と波形の間でどのような関係があるかを把握で

きていない学生は少なくない。このため、正弦波

$$x(t) = A \sin(\omega t + \phi)$$

について、振幅 A 、周波数 f 、位相 ϕ をスライダで動かすと波形がどのように変化するかをリアルタイムで観察できるようにした(図 1)。この教材は JavaScript を利用して作成した中で最も単純なものである。スライダは、HTML5 で導入された、input 要素の range 属性を利用している。ページ中の数式の表示には、MathJax [6] を利用した。

指数関数も同様に頻出関数であるが、ここでは電子回路で登場するダイオードの電圧-電流特性のグラフが、高校の数学で学習する指数関数の形状と異なっていることの説明に使うことを想定している。つまり、高校の数学で学習する指数関数は e^x の $|x|$ の範囲が 5 程度で、緩やかな右上がり曲線として描かれているのに対し、電子回路で学習するダイオードの電圧-電流曲線は、あるところまでほとんどゼロで、そこから急速に立ち上がる。これらの相違は x の観察範囲の相違によるものであり、同じ関数であっても x の観察範囲を広くとると形状が大きく変化することを、観察範囲を連続的に動かすことで理解することを意図している。

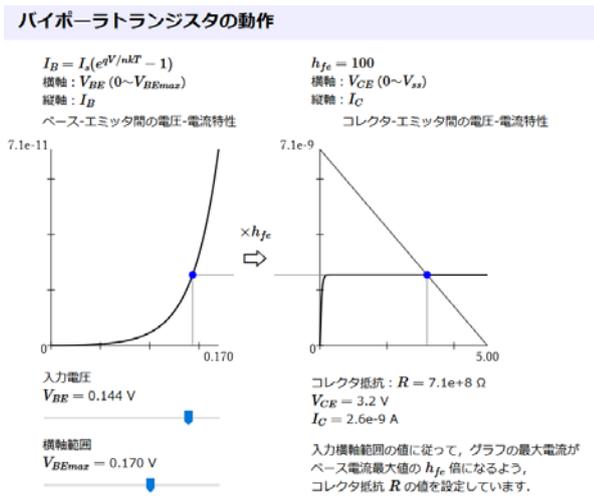


図 2 教材：バイポーラトランジスタの動作
Figure 2 Example of material: bipolar transistor.

3.2 電気電子回路

担当講義「電気電子回路 II」では、情報工学科の学生に対して、アナログ電子回路全般の知識を網羅的に紹介し、デジタルの世界と物理世界との接点に興味を持ってもらうことが主な目標である。

ダイオードのアナログ的な側面に着目したとき、動作点周辺の微小信号に対しては抵抗のような動作を行う。しかし、動作点の位置によって等価的な抵抗値(微分抵抗)が異なってくるのが、通常の抵抗との相違点である。この様子を、ダイオードの電圧-電流グラフ上に動作点を示し、その接線を描画することで表現した。

バイポーラトランジスタは、ベース電流によってコレクタ-エミッタ間の特性が変化する。この様子を、紙媒体の資料では複数の線により表現している場合が多い、動的グラフを使えば、与えるベース電圧によりどのようなベース電流が流れ、それによってコレクタ-エミッタ間の特性がどう変化するか、自分でスライダを動かして確認することができる(図 2)。

HTML と JavaScript を使ったグラフ描画のツールとしては、Chart.js [7] などのチャートライブラリが広く使用されているが、本教材では単にグラフを描画するだけでなく説明のための付加要素を加えるため、汎用的なチャートライブラリを使用せず HTML5 の Canvas API を直接使って実装した。

電子回路系で 3 つ目の教材は、FM 変調のスペクトルである。AM 変調のスペクトルと比べ、FM 変調のスペクトルは数式が複雑で直感的な理解が難しい。周波数 f_c の搬送波に周波数 f_m の正弦波を信号として乗せる際、AM 変調では搬送波に $f_c \pm f_m$ の周波数成分が加わるのに対し、FM 変調では搬送波も含め $f_c \pm n f_m$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) の周波数成分が、振幅比 $J_n(m_f)$ で構成される。 $J_n(m_f)$ は第 1 種 Bessel 関数であり、その値が変調指数 m_f によって変化するため、式を見ただけではどのようなスペクトルになるのかを理解しにくい。そこで、変調指数 m_f を変化させると FM 変調波のスペクトルがどのように変化するかを確認するグラフを、Bessel 関数群のグラフとともに表示した(図 3)。Bessel 関数の計算には、Bessel.js [8] を利用した。

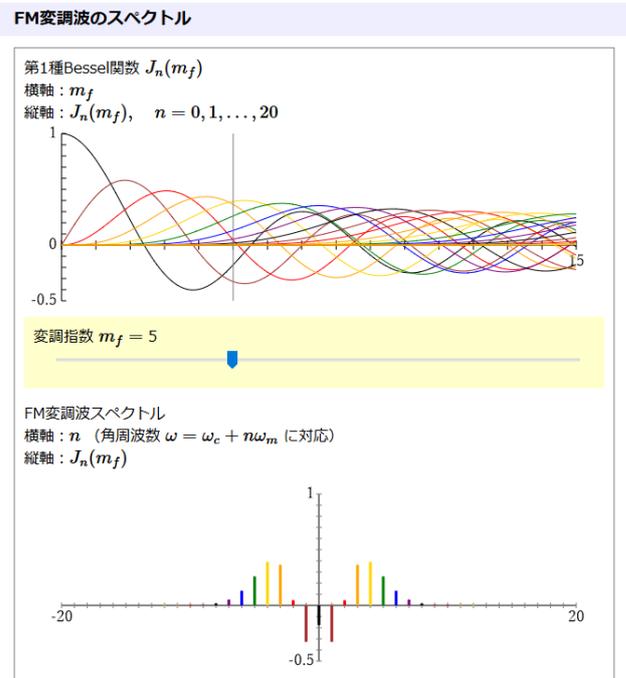


図 3 教材：FM 変調波のスペクトル
Figure 3 Example of material: FM spectrum.

3.3 デジタル信号処理

担当講義「デジタル信号処理 I」は、デジタル信号処理の入門編で、連続時間の世界と離散時間の世界の対応関係を理解することが主な目標である。

最初に、連続時間正弦波をサンプリングした離散時間信号がどのような信号になるかを示す図表を作成した(図 4). 図 1 の連続時間信号を一定間隔(サンプリング周期)で標本化したときの離散時間信号が表示される. 図 1 と同様の連続時間正弦波の 3 つのパラメータに加え、サンプリング周波数をパラメータとして指定する.

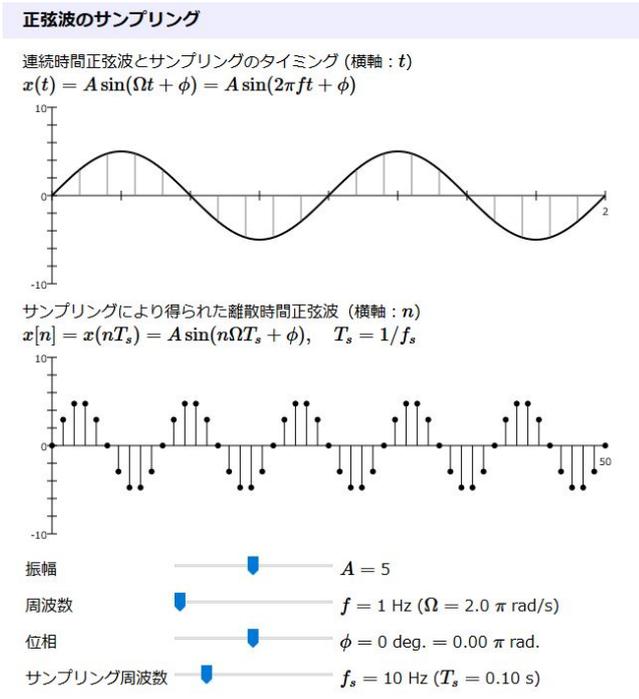


図 4 教材：正弦波のサンプリング
Figure 4 Example of material: sampling of sine wave.

次に、離散時間の世界においては信号が周波数に関して周期的になることを確認する教材を作成した. 2 つの離散時間正弦波のグラフを上下に並べ、それぞれの周波数を指定できる. チェックボックスをオンにすると 2 つの正弦波が一定の周波数差を保ちながら周波数を変化させることができる. 周波数差を 2π (の整数倍) にすると、上下で全く同じ波形が現れることが観察される.

線形時不変システムの入出力関係を表す畳み込みの式も、理解に時間を要する項目の一つである. 畳み込みの式

$$y[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[m]h[n-m]$$

において、 $h[n-m]$ がインデックス m に関して時間反転し、 n サンプルシフトしているが、元の信号 $h[m]$ に対してどのようなものか、直感的にはわかりにくい. そこで、元の信号を数サンプル分の値とシフト量 n の値を指定して $h[n-m]$ がどのような信号になるかを図示した.

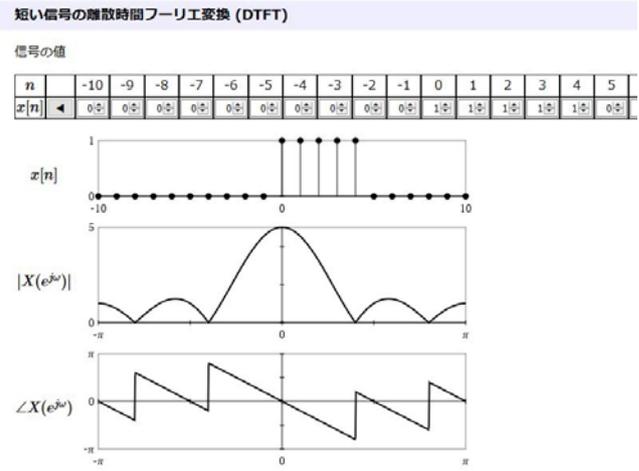


図 5 教材：短い信号の DTFT
Figure 5 Example of material: DTFT of a short signal.

離散時間フーリエ変換 (DTFT) は離散時間信号の時間領域と周波数領域を対応づける重要な関係式であり、多くの教科書で例が掲載されているが、紙面が限られるため十分な量の例を示すことは難しい. そこで、これを補う意味で、自分で信号の値を数点~10 点程度指定し、その DTFT を観察する教材を作成した(図 5). 信号の値を保ったまま、1 サンプルずつ進む・遅らせるボタンも用意した. 信号をインパルス応答と見なせば、短い FIR (Finite Impulse Response) システムの周波数応答が得られる. 実信号に対するスペクトルの対称性、時間シフトでは振幅スペクトルが変化せず位相スペクトルの傾きが変化すること、信号を

$$X(e^{j\omega}) = A(\omega)e^{j\theta(\omega)} = |X(e^{j\omega})|e^{j\angle X(e^{j\omega})}$$

の形で表したとき、 $A(\omega)$ の符号が反転する周波数で位相 $\angle X(e^{j\omega})$ の値が π 飛ぶことなどが観察できる. この位相が飛ぶ現象は、デジタル信号処理の初学者が周波数特性のグラフを見たときに理解しづらいポイントの一つである.

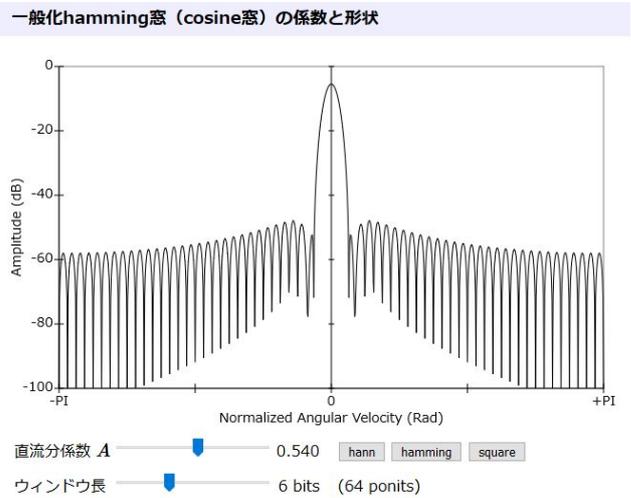


図 6 教材：一般化 hamming 窓の係数と形状
Figure 6 Example of material: generalized hamming window.

窓関数は信号処理を学習する上で必ず登場する項目であるが、窓関数がなぜそのような形になっているのかについて記述されている資料は少ない。中でも、同じ構造を持つ hann 窓と hamming 窓は係数がほんの少し異なるだけであるが、その係数の意味について書いてある教科書は少数である。矩形窓以外の窓関数を用いる理由として、矩形窓をかけると周期化した際に信号の不連続が生じ周波数解析に悪影響を及ぼすという説明が行われることはしばしばであるが、だとすると hamming 窓が非零の値から立ち上がる理由の説明が見つからない。この疑問は初学者にとっては詳細過ぎるかもしれないが、筆者自身が学生時代に抱いた疑問であり、この科目を担当する時に思い出し、整理することによりはじめて納得した経緯がある。そこで、定数とコサインの振幅の合計が 1 になる一般化 hamming 窓

$$w[n] = A - (1 - A) \cos \frac{2\pi n}{N - 1}$$

について、定数 A の値を変化させると周波数領域で窓関数の形がどうなるかを示す教材を作成した (図 6)。 $A = 1$ の場合は矩形窓に一致する。hann 窓は $\omega \rightarrow \pm\pi$ においてサイドローブの値が小さくなる性質を持つのに対し、hamming 窓はメインローブの直近にあるサイドローブの高さを極小化する (その代わりに、 $|\omega|$ が大きくなってもサイドローブの高さは一定以下には下らない) 設計になっていることがわかる。

伝達関数の零点, 極と周波数特性

2次ARMAシステム

$$H(z) = \frac{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}} = \frac{z^2 + a_1 z + a_2}{z^2 + b_1 z + b_2} = \frac{(z - z_{z1})(z - z_{z2})}{(z - z_{p1})(z - z_{p2})}$$

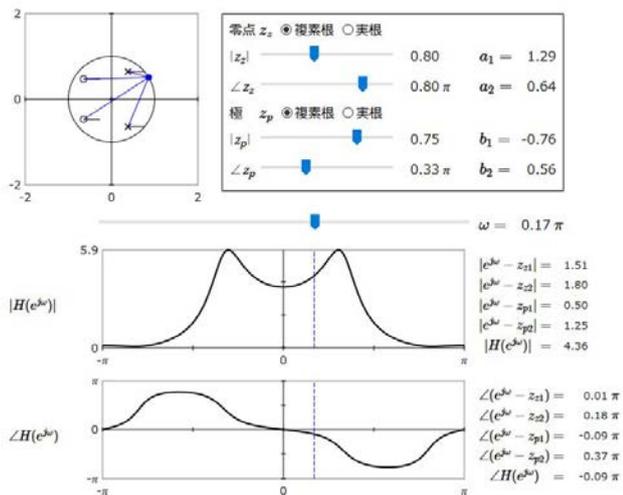


図 7 教材：伝達関数の零点, 極と周波数特性 (2 次)
Figure 7 Example of material: pole-zero location and frequency response (2nd order ARMA).

離散時間線形時不変システムの周波数特性は、極と零点の配置によって決まる。このことを学習するため、 z 平面上に小数の極と零点を配置し、周波数特性 (振幅特性と位

相特性) を観察する教材を作成した (図 7)。周波数特性は伝達関数の z 平面における単位円上の値であり、この単位円上のあたりをここではカーソル点と呼ぶことにする。振幅特性は各零点とカーソル点の距離の積を各極とカーソル点の距離の積で割ったもの、位相特性は各零点からカーソル点への偏角の和から各極からカーソル点への偏角の和を差し引いたものである。これらの特性を図と数値で表示し、極・零配置やカーソル点の位置を変更するとリアルタイムにグラフ形状や数値が変化する。以前、Excel により同様の内容の教材を作成したが、HTML と JavaScript に用いた実装により、ユーザーの操作に対するレスポンスが各段に向上したことを確認した。

正弦波信号のDFTによるスペクトル：窓関数の形状と裾野

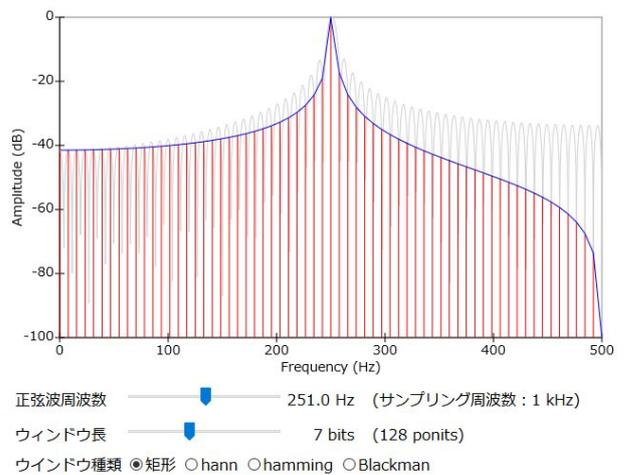


図 8 教材：正弦波信号の DFT によるスペクトル
Figure 8 Example of material: DFT spectrum of sinusoidal wave.

もう一点、初学者には細かすぎるトピックスかもしれないが、正弦波を離散フーリエ変換 (DFT) で観察したとき、純粋な線スペクトルではなく裾野を伴うスペクトルが観察される現象について取り上げた。この現象は、筆者が学生時代に研究室でアナログ発振器と FFT アナライザに触れていたとき、正弦波の発振周波数をごくわずかずらすと、FFT アナライザに表示されるスペクトルの裾野が大きく変化したことを不思議に思った経験に基づいている。

この教材の意図は、DFT が信号の DTFT を周波数領域でサンプリングしたものであることを、実例により理解してもらうことである。DTFT は数学的には成立しても、無限の過去から無限の未来の間で信号の観測を必要とするため、現実には適用できない。実際には、信号を有限長の区間で切り出し、切り出した信号を周期信号と見なして離散時間フーリエ級数 (DTFS) を計算する、DFT が利用される。正弦波を有限長の区間で切り出すということは、時間領域において正弦波に窓関数かける操作である。これは、周波

数領域では正弦波のスペクトルであるデルタ関数と、窓関数のスペクトルを畳み込むことと等価であり、窓関数のスペクトルを、中心が正弦波の周波数となるように周波数領域でシフトすることに相当する。さらに、DFTを適用するにあたり、時間領域でのサンプリングが周波数領域での周期化に対応するのと同様に、時間領域での周期化は周波数領域でのサンプリングに対応する。したがって、正弦波をサンプリングしてDFT（またはその高速計算アルゴリズムであるFFT）で観測することは、周波数シフトされた窓関数のスペクトルを、周波数領域でサンプリングしたものを観察していることに他ならない。窓関数のスペクトルは周期的に山と谷を持つ構造であり、周波数軸上でのサンプル点が窓関数サイドローブの谷にあてば、正弦波は鋭い線スペクトルとして観測される。一方、窓関数サイドローブの山でサンプリングされると、正弦波のスペクトルは窓関数に由来する裾野を持つ形状として現れる。作成した教材では、正弦波の周波数を精細に動かし、窓関数の山でサンプリングされる場合と谷でサンプリングされる場合を探索できるようにした。

HMD使用時の遅延による世界揺れ

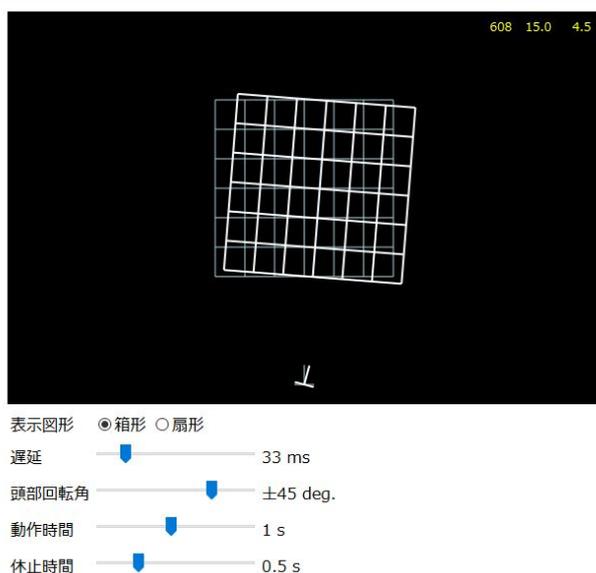


図 9 教材：HMD 使用時の遅延による世界揺れ

Figure 9 Example of material: shaky world due to the delay when using HMD.

3.4 バーチャルリアリティ

バーチャルリアリティ(VR)分野のうち、ステレオ立体視による視覚提示に関して、幾何学的なトピックスに絞っていくつかの説明用教材を作成した。VRでは人間の感覚知覚においてどのように感じられるかが最も重要であるが、それ以前に、物理的にどのような刺激が提示されているかを把握していくことも重要である。これらのうちいくつかは従来C言語とOpenGLで作成したプログラムを使って講

義中にデモを行っていたが、遠隔授業の場合ライブラリのインストールなどが必要になり受講者の実行環境もばらばらであるため、単にコンパイル済みファイルを配布するだけでは見せることができない。そこで、動くWebページの形で制作し直した。なお、内容の詳細については別発表[9]に記述する。

代表的な例は、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を使用しているとき、頭部運動から視覚刺激までの間に遅延が存在すると、どのような世界を見せられていることになるかというデモである。HMDを使用しているとき、遅延が存在すると、特に頭部回転時に世界が揺れるように観察される。完全没入型VRの場合には現実世界も遮蔽されるため比較的遅延は目立ちにくい、現実世界がそのまま観察されるAR/MR、特に光学シースルー方式のARでは現実世界の物体とCG物体との位置ずれが直接視認されるため、徹底した遅延の排除が必要である。没入型VRでも、一定限度以上の遅れは世界揺れがひどくなり、酔いの原因になりやすい。揺れを知覚できるか、また酔いが発生するかはさまざまな条件に左右されるが、まずは物理的にどの程度揺れる世界を見せられているかを把握することは重要である。

このほか、HMDの視野角と提示される映像(カメラ)の視野角が一致していないとどのような世界を見せられることになるのか、HMDでユーザーの眼間距離が装置のユニット間距離やカメラ間距離と一致していない場合にどのような世界を見せられることになるのか、さらに、大型スクリーンを使ったVRにおいて、頭部トラッキングが行われない(もしくは誤差がある)とどのような世界を見せられることになるのかに関するデモを作成した。

4. ユーザーの評価

2020年度前期の担当講義の2年次「デジタル信号処理I」(再履修クラス)、3年次「電気電子回路II」、および4年次「バーチャルリアリティ」において、これらの教材に関するアンケートを実施した。期末に回答期間1週間で任意回答・無記名としたところ、履修者に占めるアンケート回収率は56%であった。ただし、解答の中には質問項目に記入しないまま提出したものもあり、実質的な有効回答数はこれを下回る。

表 2 科目ごとの教材数とアンケート回答数

Table 2 Number of materials and answers of questionnaire

科目	履修者	回答数	教材数	教材参照数
電気電子回路	57	33	6	54
デジタル信号処理	16	7	9	16
バーチャルリアリティ	74	43	4	70
計	147	83	※18	140

※教材一部重複のため、教材ごとの科目数合計は総数に一致せず

動的グラフによる学習効果を調べるため、下記の質問を行った。

Q1: 「動くグラフ」教材について、内容の理解を深めるためにどの程度役に立ちましたか？

- (a) 参照することで理解が深まった
- (b) 参照することでまあまあ理解が深まった
- (c) 参照したが理解は深まらなかった
- (d) 参照するまでもなく十分理解できる内容だった
- (e) 参照していない
- (f) その他（使い方がわからないなど）であった。

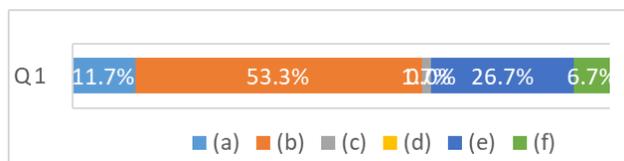


図 10 Q1: 動的グラフによる理解度深化に対する回答
Figure 10 Answer to Q1: “How was your understanding improved by the dynamic plot?”

Q1 に対する回答結果を図 10 に示す。提出された回答のうち、未記入のものは除いてある。また、回答(d)は 0%だった。この結果を見る限り、動的グラフを用意した学習項目はそこそこ難易度の高い内容で、理解向上に一定の効果はあったと考えられる。

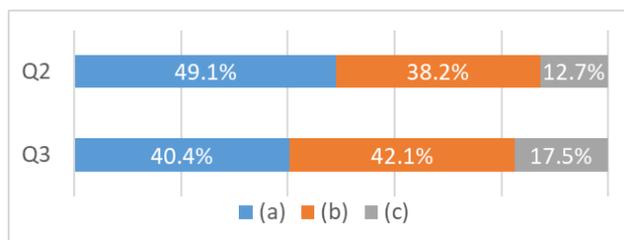


図 11 ビデオ視聴と動的グラフの比較。Q2: 学習しやすさの観点から、Q3: 理解促進の観点から。

Figure 11 Acceptability compared with video watching. Q2: Ease to learn, Q3: Promotion of understanding.

次に、動的グラフという形態が受け入れられたかどうかを見るため、以下の 2 つの質問を行った。同様の内容を動画で視聴する場合を想定し、

Q2: 「学習しやすさ」の観点からは、動画視聴と動くグラフと比べてどちらが好ましいと感じますか？

Q3: 「理解の促進」の観点からは、動画視聴と動くグラフを比べてどちらが効果的と感じますか？

回答の選択肢は、以下の通りである。

- (a) 動画の視聴
- (b) 動くグラフ
- (c) どちらともいえない

Q2 および Q3 に対する回答結果を図 11 に示す。学習しやすさの観点からは、動くグラフよりもビデオ視聴の方が好まれた。動画視聴に馴染んだ世代の反応としては、当然と言える結果であろう。しかし、Q3 の結果、すなわち理解の促進の観点からは、両者が拮抗し、むしろ動くグラフの方が若干支持を集めている。今回のアンケート結果はサンプル数が十分ではなく信頼に値する結果とは言えないが、興味深い傾向が得られたと考える。

5. まとめ

対面講義が実施不可能で、かつ動画の利用が制限される中、通信量を抑えつつ学習者の能動性を引き出すべく、グラフのパラメータを学習者自身が操作しインタラクティブに結果を確認する Web コンテンツを制作した。簡単なアンケートを行った結果、サンプル数は少ないながら一定の効果が期待される傾向が確認できた。今回のアプローチにおける最大の問題点は、教材の開発に少なからぬ労力と時間がかかることである。グラフ描画で共通に呼び出すコードをライブラリ化するなどの工夫を行ったが、それでも記述するコードは教材 1 つあたり 100 行から数百行程度であり、MATLAB などの有用なソフトウェアを利用した場合と比較すると桁違いに多い。今後は、教材の作成により学習者へ伝えたい内容と、教材作成に要する時間・労力とのバランスを考慮しつつ、学習者と教員の双方にとってメリットのある方法を探ってきたい。

参考文献

- 1) MathWorks MATLAB
<https://jp.mathworks.com/products/matlab.html>
- 2) Scilab
<https://www.scilab.org/>
- 3) MDN web docs
<https://developer.mozilla.org/ja/>
- 4) 柳田康幸：自作教材など制作物
<http://vrlab.meijo-u.ac.jp/~yanagida/edu/index.html>
- 5) GeoGebra
<https://www.geogebra.org/>
(当該教材は <https://www.geogebra.org/m/tcaetryr>)
- 6) MathJax
<https://www.mathjax.org/>
- 7) Chart.js
<https://www.chartjs.org/>
- 8) Bessel.js
<https://oss.sheetjs.com/bessel/>
- 9) 柳田康幸：VR 用視覚提示装置の幾何パラメータに関する Web 教材の作成，第 25 回日本バーチャルリアリティ学会大会 (2020)