

仮想実験室の構築(その2)

(ディジタル信号処理実験室の実装と授業例)

元石浩二*・山田貴裕*・安岡宏典**

Construction of the Virtual Laboratory

(2nd Report: Implementation of the Digital Signal Processing Laboratory
and an Example of the Lecture)

Kohji MOTOISHI, Takahiro YAMADA and Hironori YASUOKA

Abstract

The virtual laboratory is designed for the computer-aided education and is programmed with the object-oriented language C++. Various laboratories can be implemented in the virtual laboratory. In the first report, we described the graphical user interface and the execution control method which are common to all laboratories in the virtual laboratory. In this report, we describe the implementation of the digital signal processing (DSP) laboratory in the virtual laboratory, as well as an actual example of the lecture using the DSP laboratory.

Key Words: Computer Aided Instruction, Object Oriented Language, Digital Signal Processing

1. はじめに

授業を効果的に進めるためには、対象となる科目の内容にまず興味を持たせると共に、その基本的概念をできる限り明確に、また直感的な形で理解させる必要がある。このため実験や演習が重視されているが、どちらも準備と指導にかなりの手間を要し、簡単には行なえないといった難点がある。

我々はこの問題を解決するために計算機上に複数の実験室を持つ仮想的な研究室を構築し、それを用いて授業の中で簡単に実験が行なえるようにした。仮想研究室の基盤となるユーザインターフェイスと実行制御の方法については、既に前稿¹⁾で報告しているので、ここでは仮想研究室に予定されている実験室の1つであるディジタル信号処理実験室の実装とそれを「ディジタル信号処理」の授業に実際に用いた例について述べる。

2. ディジタル信号処理実験室の実装について

ここで述べる仮想研究室に限らず、計算機の画面をプロジェクターで投影する場合に問題となるのは、プロジェクターのスクリーンの大きさが限定されていることである。このため、ある程度複雑な回路を表現するためには個々の部品の表示サイズを小さくしなければならない。一方、部品の設定値や観測結果を見易くするためには、できる限り大きい方が望ましい。この相反する要求を満たすために、回路の設計には部品のアイコンを用い、設定および観測結果の表示には独立したウィンドウを用いることにしている。また、アイコンは回路図とできる限り同じ形にして、仮想研究室を授業に用いる場合に素直に理解できるようにしている。

部品アイコンの配置および結線については既に前稿¹⁾で述べているので、ここではディジタル信号処理実験室に実装した個々の部品について述べることにしている。

(1) 加算器

図-1に加算器の回路図、機能および仮想研究室で用いるアイコンを示す。この部品には設定および観測ウィンドウは存在しない。

(2) 係数乗算器

図-2に係数乗算器の回路図、機能およびアイコンを示す。この部品の設定ウィンドウは、図-2に示すようにアイコンの上部に小さなウィンドウが現れて、係数値を設定できるようになっている。初期値は1である。

(3) 遅延器

図-3に遅延器の回路図、機能およびアイコンを示す。なお、 x_n は現時点の値、 x_{n-1} は一時点前の値を示す。また、この部品には設定および観測ウィンドウは存在しない。

(4) 端子(終端器)

図-4に出力をとりだすための端子の回路図、機能およびアイコンを示す。この部品には設定および観測ウィンドウは存在しない。

(5) ファンクション・ジェネレータ

図-5にファンクション・ジェネレータの設定ウィンドウを示す。画面を有効に利用するために、設定によく用いられる機能だけができる限りコンパクトな形で最初

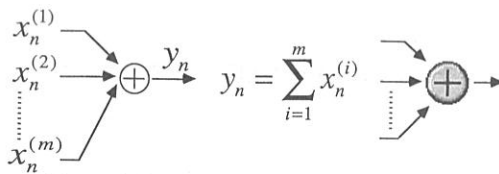


図-1 加算器の回路図、機能およびアイコン

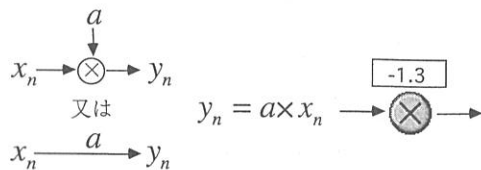


図-2 係数乗算器の回路図、機能およびアイコン

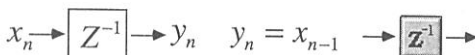


図-3 遅延器の回路図、機能およびアイコン

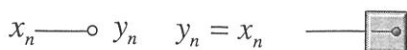


図-4 端子の回路図、機能およびアイコン

に表示される。すなわち、周波数と振幅の調整ダイヤルは同軸ダイヤルの形をしており、ダイヤル上のタブを押して回すことにより、周波数と振幅をそれぞれ独立に設定することができる。設定値はそれぞれの設定窓に表示される。

波形スコープにはファンクション・ジェネレータが発生している波形が表示され、オフセット用スライダはその直流バイアスの値を、位相用スライダは初期位相を調整する。また、調整を容易にするために、スライダをダブルクリックすれば中間位置、すなわちオフセット用スライダの場合には零バイアス、位相スライダの場合には180°に設定されるようになっている。

ファンクション・ジェネレータから実際に出力される波形は標本値信号であるが、観測し易いように図に示すように連続波形としても表示できる。

拡張ボタンを押せば図-6に示すように設定ウィンドウが広がり、矩形波、三角波、鉅歯状波、インパルス、正弦波、任意関数波形の選択ができるようになっている。また、矩形波、鉅歯状波の場合には、そのデューティ比をスライダを用いて変更できる。スライダをダブルクリックすれば中間位置、すなわちデューティ比を50%に設定できる。

(6) シンクロスコープ

図-7にシンクロスコープのアイコンおよび実行時にそのアイコンを押したときに現れる観測ウィンドウを示

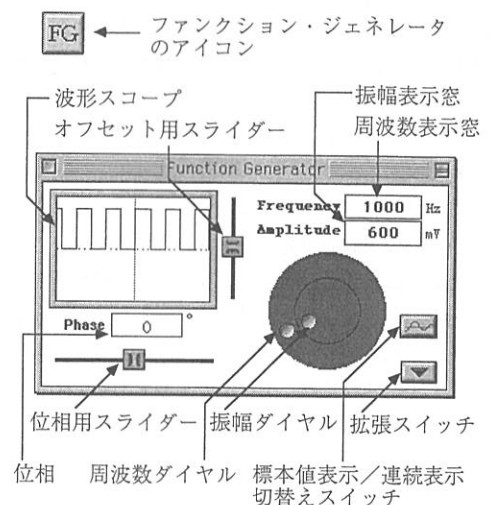


図-5 ファンクション・ジェネレータのアイコンおよび設定ウィンドウ

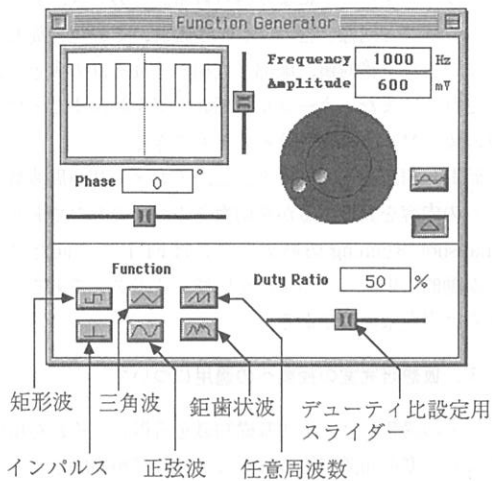


図-6 ファンクション・ジェネレータの機能拡張

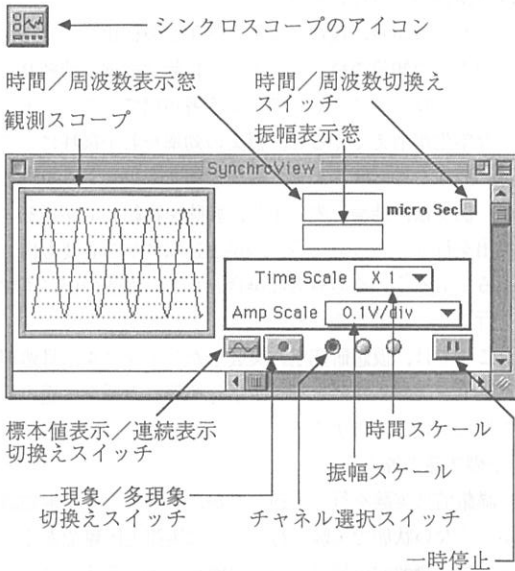


図-7 シンクロスコープのアイコンおよび観測ウィンドウ（一現象）

す。シンクロスコープに実際に入力されているのは標本値信号であるが、見易くするために図のように補間して連続表示できるようにしている。また、入力チャンネルは3つまで可能であり、図のように1つのチャンネルを選択して大きく表示することも、図-8のように複数のチャンネルを同時に表示して比較することもできる。また、時間スケールは1倍、2倍、4倍、8倍を、振幅スケールは10mV/div、20mV/div、50mV/div、0.1V/div、0.2

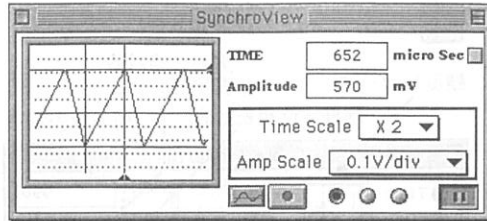


図-8 シンクロスコープの観測ウィンドウにおける周期および振幅測定

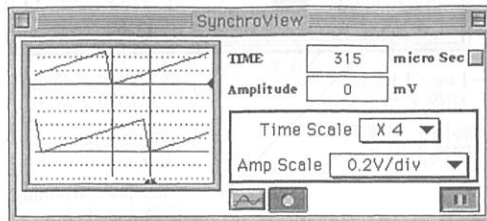


図-9 シンクロスコープにおける波形間の位相差観測

V/div, 0.5V/divを選択できる。

周期および振幅を正確に測定するためには、観測スコープ上で観測の起点をクリックすればよい。図-8に示すようにその点を通る縦と横のタブ付きのカーソルが現れる。ポインタを用いて水平または垂直タブを動かすことにより、起点との間の時間差および振幅差が時間/周波数表示窓および振幅表示窓にそれぞれ表示される。また、時間/周波数切換えスイッチを押すことにより、周期は繰り返し周波数としても表示することができる。多現象観測の場合には、図-9に示すように2つの波形の間の時間差を測定することができる。

(7) 周波数分析器

図-10に周波数分析器のアイコンおよび実行時にそのアイコンを押したときに現れる観測ウィンドウを示す。また、図-11に周波数分析器の内部構造を示す。入力されたデータは入力メモリに逐時格納され、その量が黄色の棒グラフとしてインディケータに表示される。1024点のデータが格納された時点で入力メモリの内容に窓関数がかけられて時間メモリに転送され、高速フーリエ変換(FFT)が実行される。時間窓には、矩形窓、ハミング窓、ハニング窓があり、窓関数切換えボタンを用いてその一つを選択できる。

周波数分析された結果は、実部用と虚部用からなる2

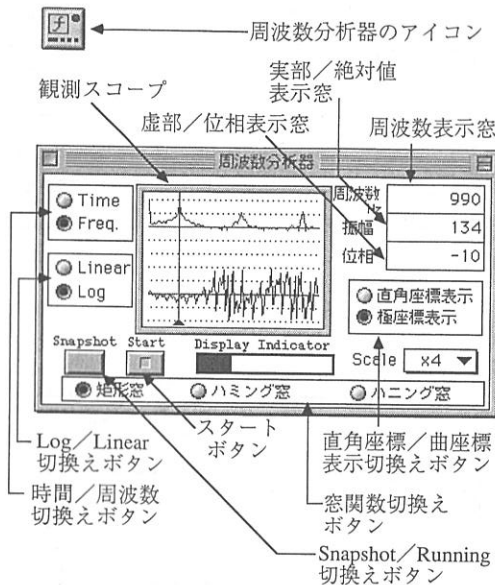


図-10 周波数分析器のアイコンおよび観測ウィンドウ

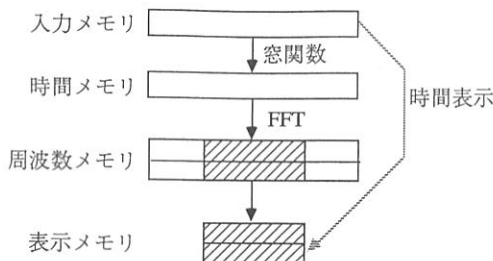


図-11 周波数分析器の内部構造

つの周波数メモリに格納されており、直角座標表示のときは上部表示メモリに実部が、下部表示メモリに虚部が転送される。極座標表示の場合には、実部および虚部から絶対値および位相が計算され、それぞれ上部および下部表示メモリに転送される。また、Log/Linear 変換もこのとき行われる。

観測スコープは2現象であり、上部および下部表示メモリの内容がそのまま表示される。スケールは1倍、2倍、4倍、8倍が選択でき、 n 倍のスケールの場合、全体の $1/n$ が表示される。このため、全体のどの部分が表示されるかをインディケータに赤の長方形で表示させている。また、この赤の長方形をスライドさせることにより、表示区間を変えることができる。

観測データの正確な値は、観測スコープ上の所望の点

をクリックすることにより得られる。このとき、シンクロスコープと同様に縦カーソルが現れ、その点の周波数および実部/絶対値、虚部/位相がそれぞれの表示窓に示される。また、カーソル下部のタブを動かすことにより、カーソルを移動させることもできる。

時間/周波数切換えボタンは、入力メモリか周波数メモリの内容を表示するかを切換えるためのものであり、Snapshot/Running 切換えボタンはFFTを一回だけ行うか動的に更新していくかを切換えるボタンである。これらは現在未実装である。

3. 仮想研究室の授業への適用について

従来の講義では、まず基礎知識を習得し、それを用いてより高度な知識が得られるように授業が構成されるのが普通であった。その延長線上にそれまでに得られた知識の総合的な応用とより深い理解を助けるものとして実験・演習が位置付けられてきた。

しかしながら、現在のように学生が多様化してくると、このような知識の積み上げ方式では勉強意欲が持続せず途中でドロップアウトしてしまう者が出てくる。このような学生が増えてくると、授業の効率を若干犠牲にしても、興味を持たせるように授業形態を変更せざるを得ない。例えば、結論を先に示し、興味を喚起してからその導出を行うといった具合に順序を逆転させる必要も出てくるであろう。その極端な場合として、講義の前に実験を行うことが考えられる。

ここでは、仮想研究室に実装したデジタル信号処理実験室を実際に「デジタル信号処理」の授業に適用した例について報告する。

[予備知識の導入]

講義前に実験を行うと述べたが、背景となる予備知識が全くない状態で実験を行うことは実際上困難である。そこで、離散的信号についての簡単な話、デジタル信号処理の3つの構成要素(加算器、係数乗算器、遅延器)の説明を行い、仮想研究室を用いてその振舞いを視覚的に理解させた。次に、3つの構成要素を組み合わせることにより任意のフィルタを構成できることを述べ、その証拠として、仮想研究室を用いてフィルタを実際に動作させてみることを学生に提案した。具体的には次の手順で仮想実験室と授業を行った。

[仮想実験室内でのフィルタの構築]

仮想研究室ではメモリが許す限り何個でも部品を使用することができるが、実現回路の機能と回路の見易さと

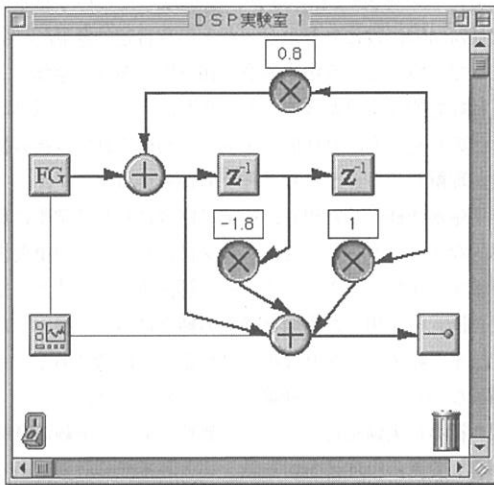


図-12 2次の帯域除去フィルタ

の兼ね合いから2次の帯域除去フィルタを例にとることとした。図-12に示すように各部品間の結線を行い、ファンクション・ジェネレータからの入力とシンクロスコープからのプローブをつなげば2次の帯域除去フィルタの実験の準備は完了する。なお部品配置・結線の仕方については、前稿⁽¹⁾で述べているのでここでは割愛する。

[回路チェックと実行制御]

作業台ウィンドウ上の電源スイッチを押すと、結線に誤りがないかどうかのチェックが自動的に行われ、誤りがなければ制御ウィンドウが現れて連続実行、ステップ実行等が可能になる。また、連続実行時の実行速度をスライダーを用いて変えることもできる。

ファンクション・ジェネレータのアイコンを押して図-6の設定ウィンドウを出し、必要な波形と振幅・周波数をセットする。また、シンクロスコープのアイコンを押して図-7の観測ウィンドウを出し、入力信号を上部に、出力信号を下部に表示する2現象モードにセットする。最後に、各係数乗算器のアイコンを押して係数値を図-12のようにセットする。

[実験と授業]

以下の順序で実験を進め、入出力波形をシンクロスコープの観測ウィンドウでそれぞれ観測する。

(1) ファンクション・ジェネレータで鉅歯状波を発生させ、実験回路の出力波形がどうなるかを学生に予想させる。多くの学生は、鉅歯状波を予想する。実際の出力は図-13のような複雑な波形となる。この実験は、フィルタを単なる増幅器の一種と考える思い違いを正すのに適

している。また、なぜそのような波形が出てくるのかといった好奇心を引き出すのにも有効である。

(2) ファンクション・ジェネレータで正弦波を発生させ、実験回路の出力波形を予想させる。前の実験結果から、多くの学生は複雑な波形を予想する。実際の出力は図-14のように単に振幅と位相が異なる正弦波となる。この実験により、周波数は変化しないことおよび正弦波の重要性をしっかりと認識させる。

(3) 正弦波入力の場合、なぜ出力波形も正弦波となるかをデジタル信号処理の構成要素（加算器、係数乗算器、遅延器）の線形性を基に説明する。

(4) 鉅歯状波の入力の場合、なぜ出力波形が鉅歯状波にならないのかを考えさせる。

(5) 鉅歯状波は複数の正弦波からなることをフーリエ級数を用いて説明し、周波数分析器を用いて視覚的に確認させる。

(6) 全ての周波数について、出力の正弦波が入力正弦波に対して同じ振幅比、同じ遅延時間を持つ場合にだけ出力波形は入力波形と相似になることを納得させる。

(7) 正弦波の周波数を変えたとき出力波形の振幅がどのように変化するかを観測し、図-15のようにグラフ上に各自プロットさせる。低域フィルタ、高域フィルタ、帯域フィルタ、帯域除去フィルタについて簡単に説明し、振幅特性のグラフから実験回路が帯域除去フィルタとして働いていることを理解させる。

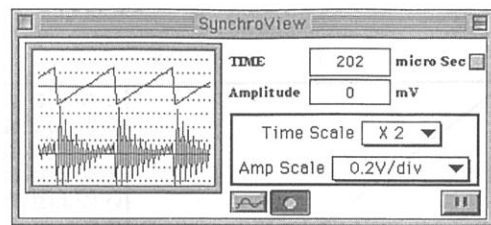


図-13 鉅歯状波入力とその出力波形

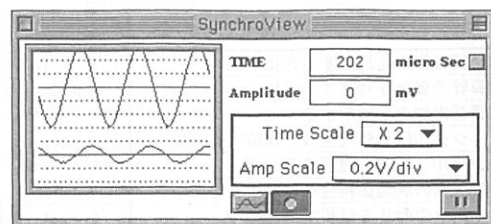


図-14 正弦波入力とその出力波形

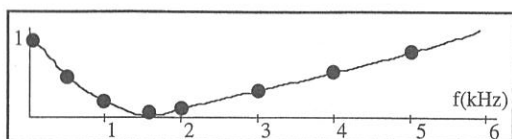


図-15 実験回路の振幅特性

(8) 周波数によってフィルタの出力が変化することから、多数の正弦波から構成されている鉅歯状波の場合には、その出力が変化することを納得させる。

(9) 乗算器の係数を変えて上記(7)の実験室を繰り返し、ディジタルフィルタの特性が係数によって簡単に変え得ることを納得させる。

以上の実験をビデオプロジェクターを用いて教室で行い、同時に関連する知識を教えていくことにより、周波数とフィルタについての基礎的な概念をまず視覚的・直感的に与え、ディジタル信号処理に対する興味を喚起した上でディジタルフィルタの構成の方法や解析の手法について授業を進めていった。

なお、ここでは述べないが、この他にも位相特性やインパルス応答とシステム関数の関係を理解させる等、仮想研究室を授業に応用し得る余地は大きい。

講義が全て終わった後、アンケート調査を行った。受講者104名に対し、回答者84名で解答率81%である。アンケートは8つの設問について行い、それぞれについて否定から肯定までの5段階で解答してもらった。結果をま

表-1 アンケート結果

	大変役に立った	まあ役に立った	どうでもよい	あまり役に立たなかった	むしろ役に立たなかった
遅延器の働きを理解するのに	0	5	8	42	29
加算器の働きを理解するのに	0	5	10	40	29
乗算器の働きを理解するのに	0	6	17	41	20
ディジタル信号処理全般を理解するのに	2	2	10	52	18
インパルス応答を理解するのに	0	6	11	33	34
システムの周波数特性を理解するのに	0	16	18	35	15
フィルタの働きを理解するのに	0	8	23	35	18
ディジタル信号処理に対して興味を持つのに	2	7	16	38	20

とめたものを表-1に示すが、役に立ったという肯定的意見74.4%、役に立たなかったという否定的意見8.8%、どうでも良いという中立的意見16.8%であり、全体としては好意的な意見が多かった。また、アンケート以外の学生の意見でも、具体的なイメージが得られて以後の授業が理解しやすくなったと言う者が多かった。

学生が多様化した現在、授業の内容に対して学生に具体的なイメージを持たせ、興味を持たせることの重要性がますます増してきている。その解決策の一手法として仮想研究室を用いた実験と講義の結合について提示したが、まだ始めたばかりなので試行錯誤の段階にある。しかしながらこれまでの経験から言えることは、

(1) 初めに実験を行うことには無理があり、実験の意味を理解できる程度に予備知識を導入してやる必要があること。ただし、与えすぎると実験を行った際の期待感が減少してしまう。

(2) 実験を完結した形で行わないで疑問を残す方が後の講義に興味を持たせ易い。できる限り多くの疑問や関心を引き出す形で実験を行う方が望ましい。

(3) 疑問や重要な点を整理し、明確化しておく。後の講義で理論的な説明を行う際に関連した実験が容易に想起できるようにしておくことが望ましい。

等がある。これらを一般化できるほどの経験を得ていないが、敢えて図式化すれば図-16のようになるであろう。しかし、強調しておかなければならないことは、講義と実験を結合した授業法はまだ確立されておらず、同じように授業をしても失敗する可能性もあるということである。その場の学生の雰囲気に応じて柔軟に講義と実験の組み合わせを変える等、臨機応変の処置が求められる。

4. おわりに

仮想研究室にディジタル信号処理実験室を実装し、これを用いて「ディジタル信号処理」の授業を行った例に

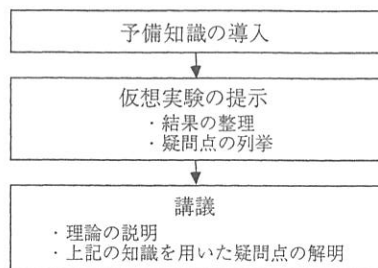


図-16 仮想実験室を用いた授業の手順

について報告した。具体的には、デジタル信号処理の実験に必要と思われる遅延器、係数乗算器、加算器、ファンクション・ジェネレータ、オシロスコープ、周波数分析器を仮想的に実現し、回路作成時には表示画面を有効に利用するために小さなアイコンを用いて部品の配置・結線を行なえるようにした。また、実行時には学生が見易く理解し易いように設定ウィンドウと観測ウィンドウをできる限り実際の機能に似せるようにした。

授業においては、仮想研究室を用いてまず具体例を提示し、喚起された疑問に答える形で講義を進めていった。このように興味と問題意識を持たせるための道具として仮想研究室は有効であり、学生の反応も好評であった。講義と実験を結合した授業形態は始まったばかりで今後の発展の可能性は大きく、色々と工夫・改良していく余地がある。しかしながら、「デジタル信号処理」の授業はカリキュラムの改訂に伴い平成11年度で打ち切りとなることが決まってしまう、十分に発展させることが不可能となった。学生の多様化が問題となっている昨今、授

業を面白く解り易い形に工夫することこそ重要と思われるのに残念なことである。現在、他の授業に適用可能かどうか検討中である。

最後に、仮想研究室の構築に協力して頂いた平成7～10年度の卒研究生の諸君に謝意を表する。

参考文献

- (1) 元石, 山田, 安岡: 仮想研究室の構築 (その1)
(ユーザインターフェイスと実行制御)
- (2) B. ストラウストラップ: プログラミング言語 C++
アジソン・ウェスレイ・トッパン (1993)
- (3) R・S・ウィナー, L・J・ピンソン: C++
オブジェクト指向プログラミング,
アジソン・ウェスレイ・トッパン (1988)
- (4) Inside Macintosh: Vol.I-VI, Apple Computer Inc.
(1992)