

エクセルを用いた位相検波方式の学習法とその効果

Evaluation of Exercise Style Learning Method for Phase Detection System with Using Microsoft Excel

福田 恵子¹⁾

Keiko Fukuda¹⁾

Abstract: Measurement of small analog signal is indispensable for various instrumentations especially in biomedical measurements. Phase detection system is one of the most widely used ways for measuring small analog signal in relatively low frequency signals. To understand the principle of such measurement system, visual and experimental instructions are helpful. Thus, I proposed an exercise style learning method for phase detection system by using Microsoft Excel. The phase detection system is modeled by the conventional functions used in Microsoft Excel. The students practiced on studying the fundamental characteristics of the phase detection system and the influence of the white noise on the system during computer exercise lessons. From the reports and the questionnaire survey to evaluate the exercise style learning, it is confirmed that the proposed exercise style learning method is valuable for learning the principle, effectiveness and applications of the phase detection system. Further, it is effective for learning the usage of some functions of Microsoft Excel. This shows that the exercise style learning method with widely used conventional software has effect with relatively short time practices.

Keywords: Analog signal measurement, Biomedical measurement, Phase detection, Synchronized detection, Microsoft Excel, Exercise style learning

1. はじめに

近年、カメラやビデオなどにおいてデジタル媒体でのデータの保存が一般的になるなど、デジタル技術の進歩は著しい。その一方で、人間と計測機器とのインターフェースはアナログであり、デジタル化の流れの中でもアナログ信号の計測技術は必要不可欠である。しかしながら、エネルギー消費の削減が求められる中で、回路の低消費電力化と低電源電圧化が進められ、検出・増幅できるアナログ信号の振幅は小さくなる傾向がある。雑音が同等あるいは電磁波などの影響で増加傾向にある中で、アナログ信号の雑音に対する信号比（S/N 比）の確保がますます厳しくなっている。これに伴い、アナログ信号の計測も難しくなっている。

このような状況の中で、アナログ信号の計測技術は、重要度を増している。特に、医療機器などの生体を対象とした計測分野では、生体の物理的特性（電気、光学、磁気など）を利用した各種診断装置が開発されており、微弱なアナログ信号を雑音の中から取り出す技術が重要となっている。本校の医療福祉工学コースは、このような医療福祉機器を開発・設計・製作するために必要な基礎力を有した人材の育成を目的として設立された全国初の高専の工学コースであり、微弱なアナログ信号の検出技術をはじめとするコース特有の技術課題に関する知識や技術の修得が不可欠で

ある。そこで、計測対象となる生体信号の特長と検出・処理方法などを視覚的、体験的に学習することを目的として、演習を通じた微弱なアナログ信号の計測技術の学習法を提案する。

微弱なアナログ信号の検出には様々な技術があるが、その中で比較的低周波（DC-100Hz）の生体信号を計測する技術として、次のものが挙げられる^[1]。

- (1) 差動形の回路構成による同相雑音の除去
- (2) 負帰還による回路増幅度等の変動に対する安定化
- (3) 四端子法による接触抵抗の影響の低減
- (4) 位相（同期）検波方式による信号成分の抽出

計装アンプに代表される(1)の差動形の回路構成や(3)の四端子法は、インピーダンスの低い生体の電気特性の計測に不可欠な技術である^{[2][3]}。また、(2)は、超伝導素子（SQUID: Superconducting Quantum Interference Device）の磁束-電圧変換特性を利用する脳機能計測装置（MEG: Magneto-Encephalogram）^{[4][5]}などに利用される技術である。

(4)の検波技術は、あらかじめ信号を周波数変調し、同一周波数の参照信号と掛算を行うことにより、同一の周波数成分を取り出す方法である。高性能のロックインアンプの原理であり、生体のインピーダンス特性、光学特性、磁気特性などの計測に共通に用いられる技術である。また、周波数解析に用いられる計測器であるベクトル演算形スペク

¹⁾東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科、医療福祉工学コース

トラムアナライザの計測原理でもある．このように，応用範囲が広い技術であることから，この技術を理解して，活用できることが重要と考える．

そこで，本研究では，位相検波方式を原理，効果，そして応用例を実際的に学ぶことを目的として，演習を取り入れた学習方法を検討した．

方式の理解する上では，視覚的，体験的に学習することが重要である．これにはPBL（Project-Based Learning）を活用した授業展開があるが，これに対して限られた時間数の中で体験的な学習を実現する方法として，マイクロソフト社のエクセルを用いた演習を考案した．信号処理に適した各種のソフトウェアがある中でエクセルを採用した理由は，基本関数や使用方法が容易であり汎用性が高いとともに，将来にわたり利用価値が高いためである．本論文では，生体計測工学他の計測系の授業にて，位相検波方式に関する演習を実施した内容と効果について報告する．

2. 位相（同期）検波の原理

今回の演習で取り上げた検波方式は位相または同期検波（以下位相検波）と呼ばれる検波方式である．図1にその原理を示す．周波数 f で変調された被測定信号を $v_s(t)=a\sin(2\pi ft)$ ，同一周波数の参照信号を $v_r(t)=a\sin(2\pi ft + \theta)$ とする．両者の掛算を行うと，検波器（PSD: Phase Sensitive Detector）出力として，以下の式が得られる．

$$\begin{aligned} v_s(t) \cdot v_r(t) &= a \sin(2\pi ft) \cdot b \sin(2\pi ft + \theta) \\ &= \frac{1}{2} ab \cos(2 \cdot 2\pi ft + \theta) + \frac{1}{2} ab \cos(\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

このうち変調信号の倍周波数（ $2f$ ）に依存しない信号成分（式の第二項）のみをローパスフィルタ（LPF: Low Pass Filter）にて選択することにより，被測定信号を取り出すことができる．ここで， b と θ が一定ならば被測定信号の振幅情報が， a と b が一定ならば被測定信号の位相情報が得られる．

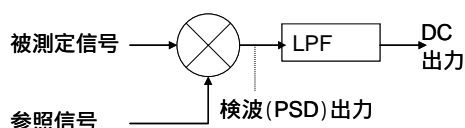


図1 掛算検波の原理

3. 演習方法

3.1 演習の目的

位相検波とエクセルによる演算法の対応を理解したうえで，次の3点の習得を目標として演習を実施した．

- (1) 位相検波の原理を理解すること．
- (2) 位相検波の効果を理解すること．

(3) 位相検波の用途を理解すること．

さらに，演習への取り組みによる興味付けにより，計測精度を向上するための信号処理技術や位相検波方式を採用している計測装置に関心を持ち，各自がより発展的な学習を行うことが期待できる．

3.2 演習項目と内容

演習の具体的な実施項目を表1に示す．

まず，原理確認のための事前準備として，演習1の理論値を算出する．位相検波の原理をエクセルで実現するにあたり，変調信号を振幅 ± 1 の方形波とした．図2に方形波の変調信号による掛算検波法を示す．図2(1)から(4)の各図の横軸は時間の相対値，縦軸は電圧の相対値をそれぞれ示す．被測定信号と変調信号の位相差が0度のとき，検波出力の信号は，図2(3)に示す全波整流波形となる．被測定信号の振幅を $a=1$ とすると，検波出力及び復調後の出力信号は(2)，(3)式で表される．

$$v_s(t) \times v_r(t) = \begin{cases} \sin(2\pi t/T) \cdots (0 \sim 180^\circ) \\ -\sin(2\pi t/T) \cdots (180 \sim 360^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

表1 演習の項目

	実施項目
事前準備	原理の確認 (机上計算)
演習1	原理の理解 (正弦波への適用)
演習2	雑音を含んだデータへの適用
演習3	振幅変調波への適用

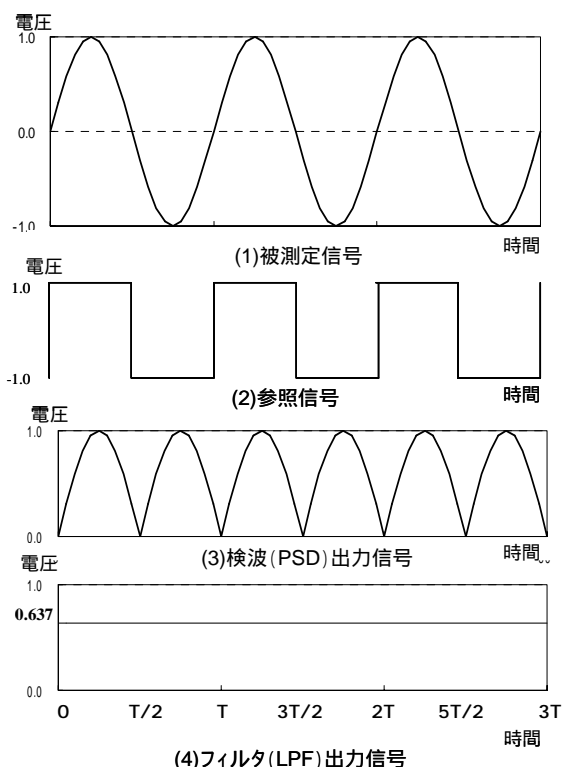


図2 方形波による掛算検波(位相差 =0度のとき)

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{T} \int_0^T v_s(t) \times v_r(t) dt \\
&= \int_0^{T/2} \sin(2\pi t/T) dt - \int_{T/2}^T \sin(2\pi t/T) dt \quad (3) \\
&= -\frac{1}{2\pi} ([\cos(2\pi t/T + \theta)]_0^{T/2} - [\cos(2\pi t/T)]_{T/2}^T) \\
&= \frac{2}{\pi} \approx 0.637
\end{aligned}$$

次に、演習 1 では、エクセルを用いて正弦波の被測定信号に対して、図 2(3)に相当する検波出力と(4)に相当する復調後の信号の各波形と(3)式の理論値に対する計算値を求める。位相検波の原理を出来るだけ容易に検証するために、被測定信号の 1 周期当りのサンプリング点数を 20 点とした。また、位相検波出力信号の波形が、位相差 0 度の場合には全波整流波形になることを利用して、掛算を行わずに絶対値関数 (ABS) を利用して生成した。これは、エクセルの関数の利用を増やしてエクセルに慣れさせるためである。さらに、復調出力信号は、ローパスフィルタの代わりに平均化関数 (AVERAGE) を利用して一周期の平均値を算出した。

なお、被測定信号の振幅 a は出席番号等により分類し、同じ数値にならないように配慮した。

また、演習 2 では乱数関数 (RAND()) を用いて振幅 a 、平均値 0 の白色雑音を発生させて演習 1 の信号へ加算して、雑音が重畳された際の検波結果を求める。この際、発生する雑音は、ファイルを開くたびに变化するため、乱数により発生した雑音の値をあらかじめコピーして利用するよう指導した。この乱数をコピーする作業は、学生間のファイルコピーの発見・抑止効果がある。なお、演習に用いた RAND() 関数は一様乱数を発生する関数であり、得られる白色雑音は通常の計測にて扱う振幅が正規分布となる白色雑音とは性質が異なっている。

さらに演習 3 では、被測定信号を振幅変調波とした際の特性を調べる。被測定信号 $v_{s3}(t)$ を振幅 A 、変調度 C 、搬送波の周期を T 、信号周期 T_2 とすると、 $v_{s3}(t)$ と検波後出力信号は次式で示される。

$$v_{s3}(t) = A \cdot \sin(2\pi t/T) \times (C \sin(2\pi t/T_2) + 1) \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
& v_{s3}(t) \times v_r(t) \\
&= A \cdot \sin(2\pi t/T) \cdot (C \sin(2\pi t/T_2) + 1) \cdot \sin(2\pi t/T) \quad (5) \\
&= \frac{A}{2} \{ \cos(4\pi t/T) + 1 \} \cdot (C \sin(2\pi t/T_2) + 1) \\
&= \frac{A}{2} \{ \cos(4\pi t/T) \cdot \{ C \sin(2\pi t/T_2) + 1 \} + C \sin(2\pi t/T_2) + 1 \}
\end{aligned}$$

復調後は、変調周波数に依存しない成分として第 3 項と第 4 項が得られ、直流と周期 T_2 の被測定信号が得られる。

3.3 演習の実施方法

演習を実施する前に、第一章にて示した(1)-(3)の 3 種類の生体信号の計測技術に関してあらかじめ講義した。また、白色雑音の定義と性質及び、演算増幅回路で発生する雑音の性質・影響とその評価方法について、具体的な数値例題を交えて講義し、雑音低減の必要性を明らかにした。

演習では、まず、掛算検波の原理を 1 時間説明した。次に、演習 1 に相当するエクセルフォーマットのデータ例をスクリーンで示しながら具体的な演習を 1 時間実施し、残りを課題として各自取組むよう指導した。演習の実施後、エクセルのデータファイルと演習に関する考察を提出させた。また、課題の提出後、位相検波の用途に関する講義と総括を 1 時間行い、実施内容を確認し、演習に関するアンケートを実施した。授業での実施時間は合計 3 時間である。

4 演習の結果

4.1 演習の実施例

演習の実施例を図 3 に示す。ここでは、提出されたデータをできるだけ加工しない形で表示をしている。演習 1 では図 2 の特性をエクセルで実現し、復調後出力として約 0.6V の直流値が得られることが確認できている。演習 2 では白色雑音を含んだ信号に検波を行うことで雑音を含んでいるが直流値が得られ、原波形に比べて雑音の影響を低減して信号成分が検出できることが確認できている。また、演習 3 では、図中の点線で示すフィルタリング後の波形のように、搬送波と信号の積であった被測定信号から信号と搬送波の直流値が抽出できることが確認できる。以上のように、演習により視覚的に掛算検波の原理と掛算検波の効果が確認できる。なお、図 3 に相当する結果は、演習を実施した全学生が得ることが出来た。

4.2 演習実施結果の評価

まず、演習での学生の考察を通して、演習の効果について検証する。

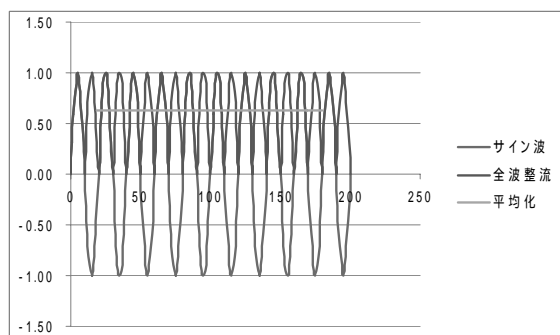
演習 1 については、一周期当りのデータ点数を増加させること、すなわち、サンプリング点数を増加することが復調後出力の誤差低減に有効であることを 55% 以上の学生が考察として述べ、25% 以上の学生が追加の解析を行い実際に誤差が低減できることを示した。演習 2 については、白色雑音の影響を低減するには平均化を行うデータ点数を増やすことが有効であることを 60% 以上の学生が考察として述べ、23% 以上の学生が追加の解析を行い示した。このように、演習結果を事前に学習した内容や他教科での学習した信号処理技術と結びつけることが出来ている。さらに、誤差低減に関しては、電子回路で学んだ差動形の回路などの他の雑音低減技術との併用に

ついて言及する考察もあり，他教科での学習内容との関連付けが行われていた．

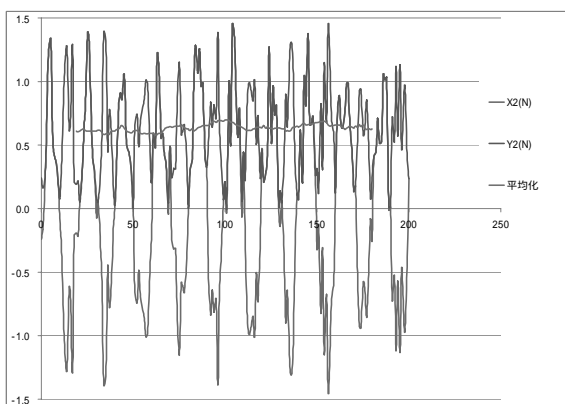
以上のように，演習を行うことで視覚的，体験的に検波の原理と効果を知ることが可能であると共に他の教科科目との関連性，学習内容との関連性の把握に有効であると考える．

次に，アンケートを通して演習の効果について検証する．アンケートは，ツールとして利用したエクセルと掛算検波の演習の効果に関して調べるために，本演習の総括後に実施した．

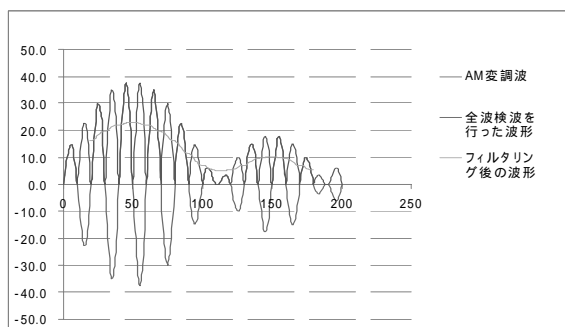
ツールとして使用したエクセルに関して調査した結果，本年度，この課題以外で利用している学生は 78%であった．多くの学生が卒業研究等で利用していることがわか



(1) 演習 1



(2) 演習 2



(3) 演習 3

図 3 演習の実施例

る．演習の中で，使用した関数や機能の利用状況は，図 4 に示すように絶対値の算出などの基本関数や列の参照方法などの基本機能を初めて利用した学生が多いことがわかる．このことから，演習により，新しい機能を学習する効果があったと考える．

掛算検波の演習に関しては，図 5 に示すように原理，効果，用途の理解のいずれの項目においても 10%以上が役立った，60%以上がある程度役に立ったと答えており，全体として演習が検波方式の理解に対して有効であったと考える．なお，応用例まで短時間で調べることは難しかったといった意見もあった．これには，応用例を総括の中で取り上げることで理解を深めることが大切であると考える．

また，課題への取り組み方を調べた．図 6 に示すように一人が 35%，グループによるものが 40%となった．時間は 2-4 時間が 50%以上であり，比較的短い時間で効果的な学習が行えたと考える．

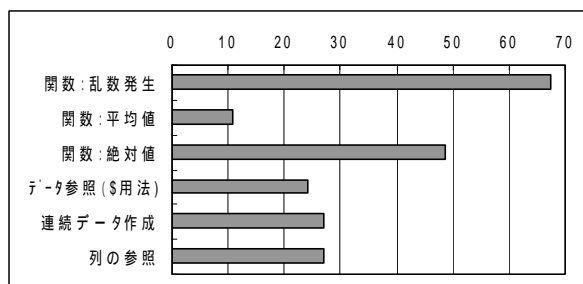


図 4 はじめて使用したエクセルの機能

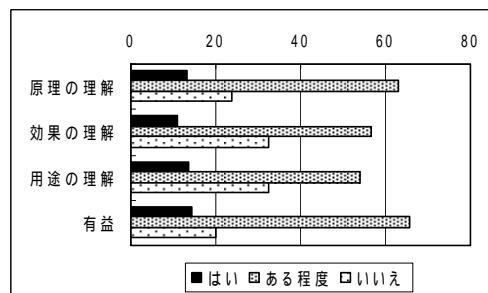
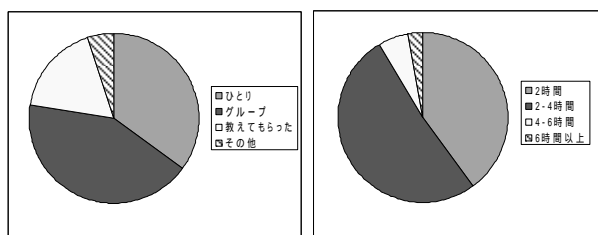


図 5 掛算検波の理解



(1) 学習方法 (2) 学習時間

図 6 課題への取り組み方

5. まとめ

アナログ信号の計測技術は、デジタル化の流れの中でも重要であり、特に、医療機器などの生体計測の分野で不可欠である。そこで、微弱信号の計測技術を視覚的、体験的に学習し理解することを目的として、エクセルを用いた演習を実施した。演習の対象は、アナログ信号検出の重要な技術の1つであり、応用範囲も広い位相検波方式とした。

演習の結果、位相検波方式の原理、効果、用途の理解に本演習が有効であることが確認できた。さらに、付加的な効果として、ツールとして用いたエクセルの基本機能の学習にも役立てることができた。以上により、短時間であっても汎用的で比較手平易なソフトウェアを用いることで効果的な演習が実施できると考える。本手法は、他の計測原理や回路特性の評価の学習にも適用できることから、今後も展開を検討する。

6. 参考文献

- [1] 金井寛，斎藤正男，日高邦彦：電磁気測定の基礎，昭晃堂，1992
- [2] 金井寛：生体電気インピーダンスとその臨床応用，医用電子と生体工学，20, pp. 140-146, 1982
- [3] K. Makie, K. Nakayama, S. Yagi et.al：Measurement of leg blood volume change by impedance plethysmography - in special reference to microgravity simulation experiment -, Proc. on 4th IMEKO Conf., 1987.
- [4] 小川誠二，上野照剛監修：非侵襲・可視化技術ハンドブック，NTS 出版，pp.401-485，2007
- [5] K. Makie-Fukuda, M. Hotta, K. Okajima et.al：Automatic adjustment of bias current for direct current superconducting quantum interference device, Review of Scientific Instrumentation, vol. 64, no. 2, pp. 583-584, 1993.