

第3学年 電気電子工学実験実習報告書

1

仮想計測器の利用と基礎的な数値処理
(Use of Virtual Instruments and basic numeric processing)

実験日 令和 04 年 05 月 12 日 (木)
令和 04 年 05 月 19 日 (木)

| | | |
|---|------|-------|
| 班 | 学生番号 | 氏名 |
| 1 | 3309 | 大山 主朗 |

共同実験者名

3326 塚原 秀翔

| 提出日 | | | 備考 | 評価 |
|-----------|--|--|----|----|
| 予定日 05/19 | | | | |
| 提出日 | | | | |

1 目的

本実験では

- LabVIEW および MyRIO を使用して、素子の電圧電流特性について自動計測の方法を習得する。
- 測定データから近似直線式の傾き、切片を求める計算方法を習得する。
- 電圧電流特性から抵抗値を求める方法について習得する。

ことを目的とする。

2 原理

2.1 LabVIEW

NATIONAL INSTRUMENTS(NI) が提供している LabVIEW は、各種計測器や myRIO などを用いて自動計測や制御を実装するためのグラフィカルユーザーインターフェースのプログラミング言語である。主な特徴は、ビルトインされた仮想計測器 (Virtual Instruments, 以下 VI) で、オシロスコープやマルチメーターなどの計測器と似た外観や機能をコンピューター上へ作成するというものである。VI は、フロントパネル、ブロックダイアグラム、アイコン-コネクタという 3 つ主要素から構成される。プログラミングは、ブロックダイアグラム上にアイコンを配置し、各アイコン間のコネクタをつなぐ形で行う。

2.2 myRIO

myRIO は、デュアルコアの ARM Cortex-A9 リアルプロセッサとカスタマイズ可能な Xilinx FPGA・アナログプロセッサの駆動するプログラミング言語には、LabVIEW を用いる。LabVIEW と myRIO を用いることにより、制御、ロボット、メカトロニクス、組込などを容易に実現することができる。

2.3 myRIO ブレッドボードアクセサリ

myRIO の拡張ポートに接続可能なブレッドボードアクセサリである。myRIO の 5V, 3.3V, GND 端子及び Analog I/O, Digital I/O の端子が、ブレッドボード上に結線した回路とヘッダにマッピングされている。そのため、ブレッドボード上に結線した回路とヘッダとをジャンパ戦で結線することにより、回路への入出力制御および計測が myRIO を用いて容易に実行することができる。

2.4 真値と誤差及び相対誤差 (誤差率)[1]

2.4.1 真値 (true value)

真値とは、測定量 (測定値ではない) が単位の何倍であるのかを示している値である。真値は必ず存在すると仮定しても我々は真値そのものは知ることができず、ただその存在する範囲を推定することが出来るだけである。そのため誤差は正負の符号を持っているが、それを確定することができない。

2.4.2 誤差及び相対誤差

全角カンマにする

測定値 (measured value) 及び、誤差 (error) はそれぞれ、式 (1)、式 (2) で定義される。

$$\text{測定値} = \text{倍数} \times \text{単位} \quad (1)$$

$$\text{誤差} = \text{測定値} - \text{真値} \quad (2)$$

また、相対誤差 (relative error) とは真値に対する誤差の比である。但し真値は不明なことが多いため、通常は式 (3) のように誤差が小さいとして真値の代わりに測定値で割る。

$$\text{相対誤差} = \frac{\text{誤差}}{\text{真値}} \approx \frac{\text{誤差}}{\text{測定値}} \quad (3)$$

相対誤差を百分率などで表した値を誤差率と呼ぶ。また、以上のことから式 (4) のように表すこともできることがわかる。[2] これは直接引用してる？ (Moodleの資料を確認した？)

$$\text{測定値} = \text{真値} \pm \text{誤差} = \text{真値} (1 \pm \text{相対誤差}) \quad (4)$$

2.5 統計処理 (正規分布・平均値・標準偏差)

2.5.1 正規分布 (normal distribution)[3][4]

左右対称の釣鐘型 (平均値から離れるにつれて個数が減る) に値が分布している分布で、山の頂点に平均値がくる。図 1 は横軸に測定量、縦軸に正規分布の確率密度関数 (probability density function) をプロットしたものである。全体の面積 (全確率) は式 (7) より 1 である。

$$p(x) = p(X = x) \quad (5)$$

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) dx \end{aligned}$$

ここで、 $x - \mu = y$ と置換すると、上式は：

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(-\frac{y^2}{2\sigma^2} \right) dy \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \sqrt{2\sigma^2\pi} = 1 \end{aligned} \quad (7)$$

2.5.2 平均値 (mean)

平均値とは N 個全てのデータの総和を N 個で割って得られる値で、式 (8) で表すことができる。[3]

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (8)$$

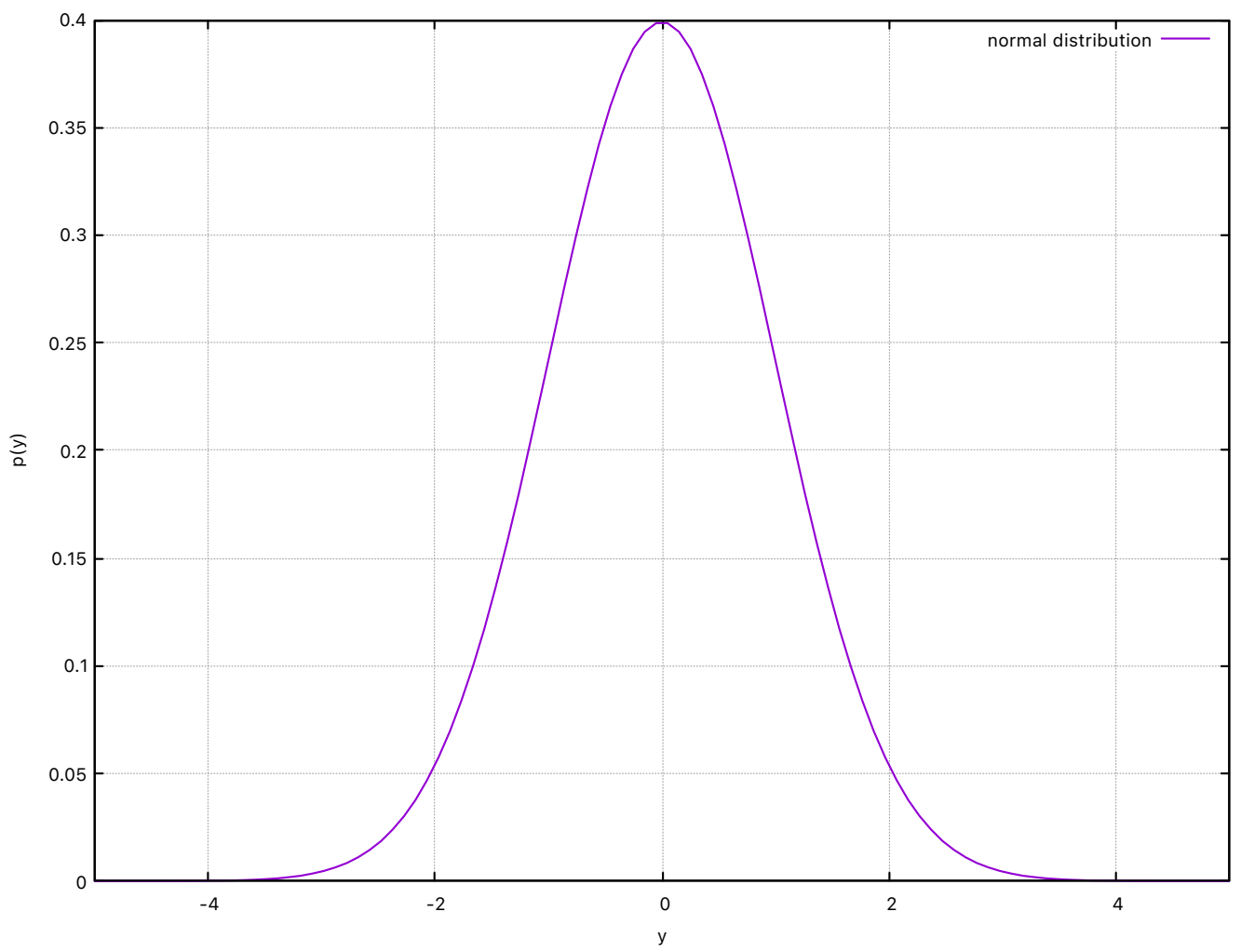


図 1: 正規分布

図が大き過ぎる。適切なサイズにすること

2.5.3 標準偏差 (standard deviation)[2]

標準偏差とは平均値を基準に各測定量がどれほどのばらついているかを定量的に表す値で、式 (9) で表すことができる。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

2.6 最小二乗法 (method of least squares)[3][5]

2つの測定データ y, x 間に一次方程式の関係があるとし、

$$y = ax + b \quad (10)$$

の傾き a 、切片 b を測定データからもっともらしい値にすることを考える。その際に、

$$\begin{aligned} I &= \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2 \\ &= \sum_{i=1}^N (y_i - (ax_i + b))^2 \end{aligned} \quad (11)$$

を最小にする a, b を求める。これを最小二乗法といい、誤差を伴う測定値の処理においてその誤差の二乗の和を最小にすることで、最も確からしい関係式を求める方法である。前述の通り、誤差は正負あるため、2乗をしている。絶対値を用いると偏微分が不可能なため、平方根を用いた方法で行っている。

$$\frac{\partial}{\partial a} I(a, b) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} I(a, b) = 0 \quad (13)$$

から得られる方程式を、それぞれ a, b について解けば良く、それぞれの解を得るための方程式は次の2つを用いることになる。

$$a = \frac{\sum_{n=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{n=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (14)$$

$$b = \bar{y} - \frac{\sum_{n=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{n=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \bar{x} \quad (15)$$

ここでは、式 (10) のように1次式の形のものを示したが、一般に式 (16) のような実験式に対して式 (17) のように定義される。

$$y = F(x; a, b, c, \dots) \quad (16)$$

(x は変数, a, b, c, \dots は定数)

$$I \equiv \sum_i (y_i - f(x_i))^2 \quad \left(\frac{\partial I}{\partial a} = 0 \rightarrow a \text{ を決定}, \frac{\partial I}{\partial b} = 0 \rightarrow b \text{ を決定} \dots \right) \quad (17)$$

3 方法

3.1 使用器具

今回の実験で使用した器具を表 1 に示す.

なお, 実験指導書ではソフトが “NI LabVIEW2015(32 ビット)” と記載されていたが, 使用した PC にインストールされていたものは “NI LabVIEW2019SPI(32 ビット)” であった.

表 1: 実験装置 型番がない

| 機器名 | 製造元 | シリアル番号 | 数量 [個] |
|-------------|----------------------|-----------------------------|--------|
| PC | iiyama | NKNK50SZ0000K00088 | 1 |
| myRIO | NATIONAL INSTRUMENTS | 308778E | 1 |
| MXP ブレッドボード | DEGILENT | D535760 | 1 |
| ソフトウェア | NATIONAL INSTRUMENTS | LabVIEW2019 19.0.H3(32-bit) | 1 |

3.2 実験手順

プログラムの実行が速く, 目視による確認が難しい場合, “ハイライトモード” を有効にすると実行過程がゆっくり表示されるようになる. また以下では, 基本的な LabVIEW の操作方法については述べない.

手順は過去
形で書く

3.3 実習 2-1

行頭記号と文章の区切りを明確にするため, ドットやかっこなどを使用する
例:

3.3.1 導通確認

- a. MXPブレッドボード...
- a) MXPブレッドボード...

- a MXP ブレッドボードアクセサリとジャンパーワイヤーを使って図 2 のように回路を構築する.
- b アクセサリボードを myRIO の A ポートに接続する.
- c ブロックダイアグラムで, “Analog Input”(Channel 欄には, “A/AI 0(pin3)” を選択) を配置し, 同右コネクタ (A/AI 0 pin3) に, “表示器” を作成する.
- d 上の計測プログラムを実行する,
- e 図 2 において “接続先を変更する” と記載されているところを **GND,3.3[V],5[V]** それぞれに接続し, 値が正しく変化することを確認する.

半角カンマで区切る場合は,
カンマの後ろに半角スペース
を入れる

3.3.2 “For ループ”

- a 上で作成した “Analog Input” ブロックと表示器とを “For ループ” で囲むように配置する.
- b カウンタ変数値の変化を表示するため, “i” に表示器を作成する.
- c “For ループ” のコネクタ “N” に定数を作成し 5 を代入.
- d 上記プログラムを実行し正しく動作していることを確認する.
- e “Analog Input” の右コネクタ (A/AI 0 pin3) と “For ループ” の右端枠に接続する.

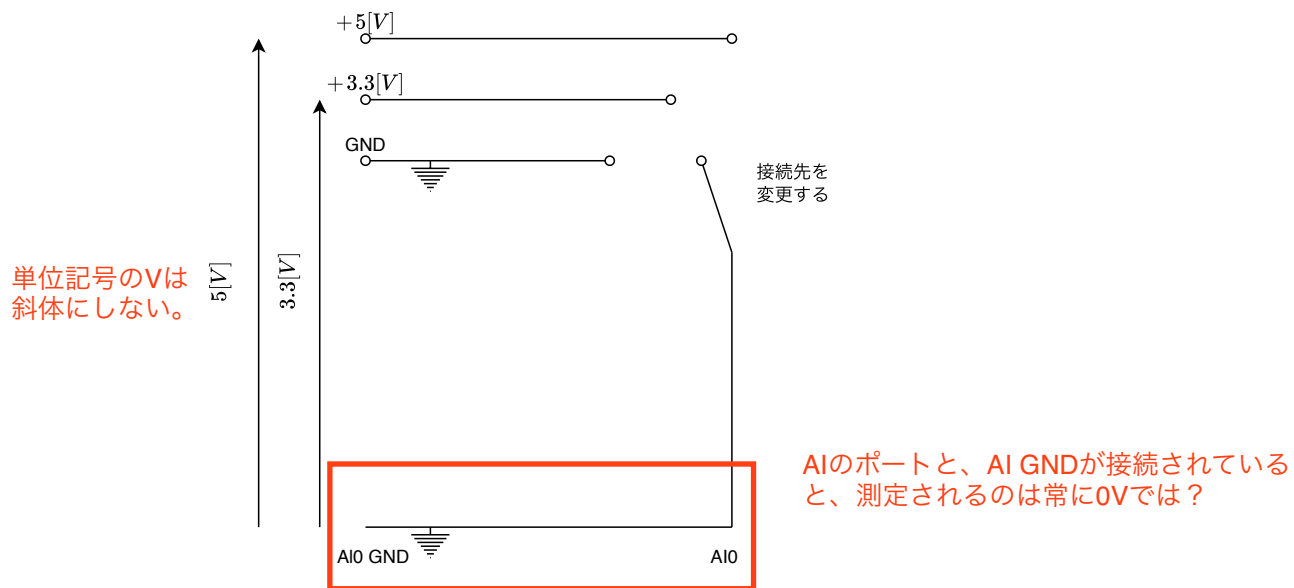


図 2: 定電圧計測回路

- f 右端枠のコネクタに表示器を作成する。(名前が“配列”になる)
- g フロントパネルの“配列”を選択し、5 段以上表示されるように変更する。
- h 作成したプログラムを実行し、“配列”(フロントパネル上の)に表示器 (A/AI0) に表示された値が表示されることを確認する。

3.3.3 “配列連結追加”

- a 上の“For ループ”プログラムに“配列連結追加”ブロックを配置する。
- b “配列連結追加”ブロックの左コネクタをカウンタ変数“i”に接続する。
- c “配列連結追加”の左コネクタに“入力を追加”を選択し、数値入力用の左コネクタが2つになることを確認。
- d “配列連結追加”ブロックの左コネクタを“Analog Input”の右コネクタ (A/AI 0 pin3) に接続する。
- e “配列連結追加”の右コネクタを“For ループ”の右端枠に接続する。
- f 右端枠のコネクタに表示器を作成する。(名前が“配列 2”になる)
- g フロントパネルの“配列 2”を選択し、5 段以上表示されるように変更する。
- h 作成したプログラムを実行し、“配列 2”に“i”の値と電圧値が2列で表示されることを確認する。

3.3.4 “配列からスプレッドシート文字列に変換”

- a ブロックダイアグラムに“配列からスプレッドシート文字列に変換”ブロックを配置。
- b ブロックの左上コネクタ (形式文字列) には何も入力しない。
- c ブロックの左下コネクタ (配列) を“For ループ”枠右コネクタ“配列 2”と接続する。

- d ブロックの被疑コネクタ (スプレッドシート文字列) に表示器を作成する. (名前が“スプレッドシート文字列”となる)
- e フロントパネルで表示されている表を適度な大きさに変更する.
- f 作成したプログラムを実行し, “配列” に “i” と電圧値が 2 列で表示されることを確認する.
- g フロントパネルの “スプレッドシート文字列” をトリプルクリックすると全て選択でき, Excel にペースト可能であることを確認する.

3.4 実習 2-1 課題実験

- a 100 回のデータ計測をするようにプログラムを変更する.
- b GND, 3.3[V], 5[V] の出力電圧を 100 回分計測し, Excel を用いて平均値と標準偏差を求める.

3.5 実習 2-2

3.5.1 定電圧計測

- a ブロックダイアグラムに “Analog Input” を配置する.
- b Configuration 画面の Channel 欄には, 電圧入力ピンとして “A/AI0 (pin3)” を選択する.
- c “Analog Input” の右コネクタ (A/AI0 pin3) に “表示器” を作成する.
- d ブロックダイアグラムに, “Analog Output” を追加する.
- e Configuration 画面の Channel 欄には, 電圧出力ピンとして “A/AO 0 (pin2)” を選択する.
- f “Analog Output” の左コネクタ (A/AO 0 pin2) に “制御器” を作成する.

3.5.2 出力電圧値変化

- a ブレッドボードアクセサリを図 3 のように構築する.
- b アクセサリボードを myRIO の A ポートに挿す.
- c 上のプログラムを実行し, “数値表示器” (A/AI0 Pin3) に表示される値を確認する.
- d “制御器” (A/AO 0 pin2) に 0[V] から 5[V] の数値を入力する. 複数回実行し, “数値表示器” (A/AI0 pin3) に表示される値を確認する.
- e “制御器” (A/AO 0 pin2) の数値をさらに変更し, 上と同様に複数回実行し, 値の変化を確認する. (電圧値の変更直後は入力値を表示値の違いがあるが, 2 回目以降はほぼ一致する)

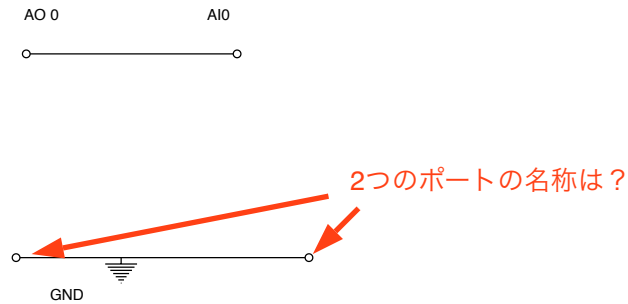


図 3: 変電圧計測回路

3.5.3 出力電圧表示値と計測電圧値を配列・文字列で表示

- a 上記のプログラムの全てのプログラムを“For ループ”で囲むように配置する.
- b “For ループ”のコネクタ“N”に定数を作成し、5を代入.
- c “Analog Output”の左コネクタ(A/AO 0 pin2)をカウンタ変数“i”に接続する. (制御器“AO0”との接続は予め解除する)
- d “配列連結追加”ブロックを追加し、その出力コネクタから伸ばしたワイヤーを“For ループ枠”に繋げ、表示器を新規作成する.
- e 作成したプログラムを実行し、“配列”に表示される電圧値を予想される値と比較する. (“ハイライトモード”有効時と無効時の違いも比較する)
- f ブロックダイアグラムに“遅延時間”を追加する.
- g “遅延時間”に制御器を追加し、“遅延時間”は0.05[秒]に設定する.
- h “AnalogOutput”の“error out”と“遅延時間”の“エラー入力”, “遅延時間”の“エラー出力”と“AnalogOutput”の“error in”を接続する.
- i “遅延時間”ブロックの追加による“配列”に表示される値の変化を確認する.
- j 遅延時間を, 0[秒],0.005[秒],0.050[秒],0.500[秒]に変え, それぞれの場合で入力値を変更し, 表示値との比較を行う. (3.5.2のように2回目以降は入力値と出力値がほぼ一致するか)
- k ブロックダイアグラムに“配列連結追加”を配置する.
- l 以降の手順は3.3.3を参照.
- m ブロックダイアグラムに“配列からスプレッドシート文字列に変換”を配置.
- n 以降の手順は3.3.4を参照.

3.6 実習 2-2 課題実験

- a 0[V] から 5[V] まで 0.5[V] 刻みで出力電圧を変え, 出力電圧値を計測する.



ex21.vi

C:\Users\student\Desktop\m20027\ex21.vi

最終変更日: 2022/05/12、時刻: 14:28

2022/05/12の14:29に印刷

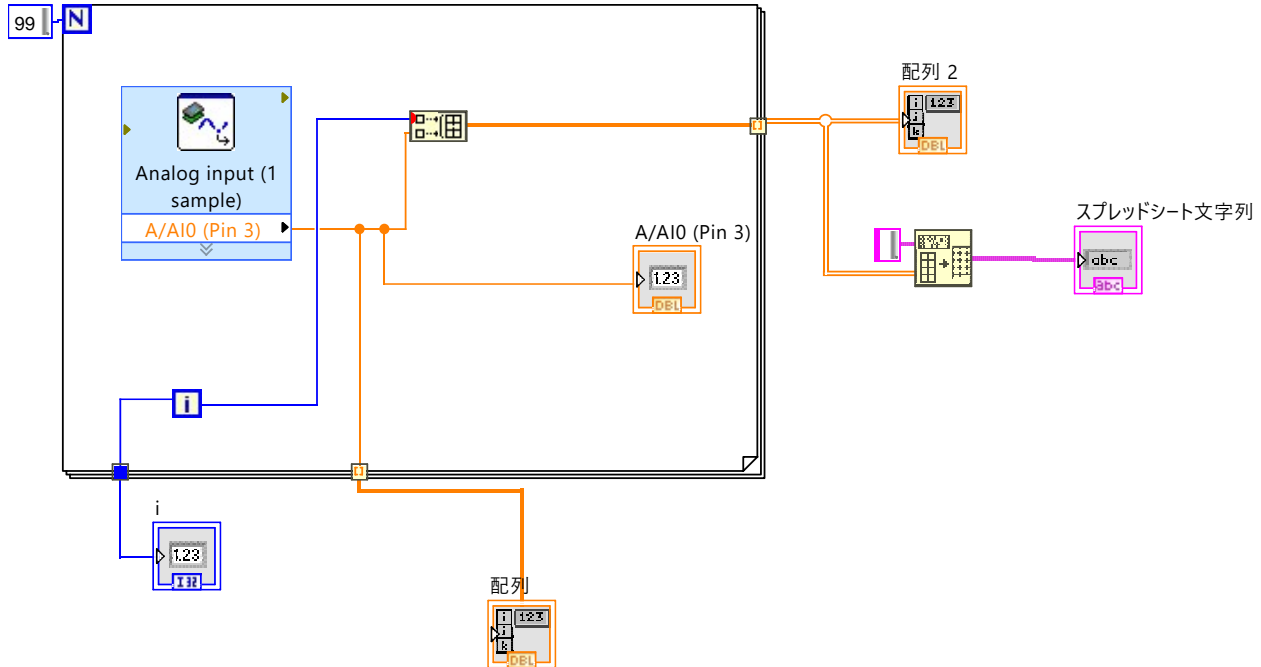


図 4: 定電圧計測のブロックダイアグラム

ブロックダイアグラムの通し番号は、(図4)ではなく(プログラム1)とする。
やり方はMoodle参照のこと。

- b “Analog Output” に入力した値・“Analog Input”() から取得した値をカウンタ変数 “i”, “Analog Output” 表示値・“Analog Input” 表示値を表示させる.
- c “出力電圧表示値” と “計測電圧表示値” との差を表示する.
- d 上で導出した差から二乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error,RMSE) を Excel を用いて求める.

3.7 実習 3

4 結果

4.1 実習 2-1

図4が何の図なのか説明文がない

- 図 4 のように N の数を 99 にすることで 100 回のデータ測定が可能となる.
- 実行後, フロントパネルでは, 図 5 のように表示された.
- 表 2 から表 4 に GND, 3.3[V], 5[V] それぞれに接続した際の出力電圧を示す. また, 表 5 は計測データから算出された平均値・標準偏差である. 算出方法は式 (18), 式 (19), 式 (20) の通りである. [6]



ex21.vi

C:\Users\student\Desktop\m20027\ex21.vi

最終変更日: 2022/05/12、時刻: 14:28

2022/05/12の14:28に印刷

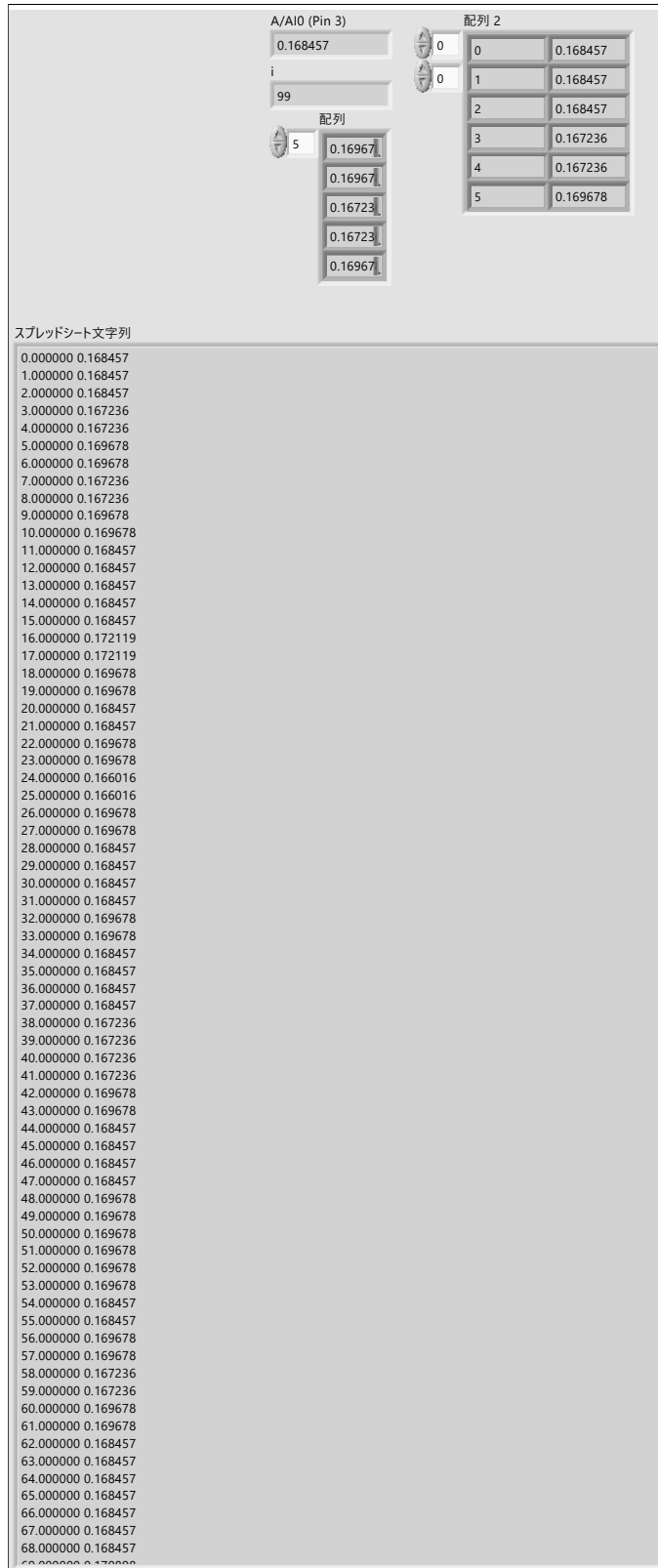


図 5: 定電圧計測のフロントパネル

$$\text{平均値} = (SUM(X_0 : X_{99}))/100 (= MEAN_v) \quad (18)$$

$$\text{標準偏差 - 推定値} = STDEV.S(X_0 : X_{99}) \quad (19)$$

$$\text{標準偏差 - 計算値} = SQRT((X_i - MEAN_v)^2/99) \quad (20)$$

X_i : データの i 番目

$SUM(A : B)$ A から B までの和を返す関数

$STDEV.S(A : B)$ 標本 A から B までにおいて、これらから母集団の標準偏差の推定値を返す関数

$SQRT(A)$ A の平方根を返す関数

$MEAN_v$ 上で計算した平均値をとる変数. $GND, 3.3[V], 5[V]$ の場合の計 3 種類.

この関数はどこから来た関数？

単位は斜体にしない

4.2 実習 2-2

- 図 6 に示すように N の値を 11 に、カウンタ変数を 2 で除することで $0[V]$ から $5[V]$ まで $0.5[V]$ 刻みで出力電圧を計測することが可能となる。
- 実行した後のフロントパネルを図 7 に示す。また、式 (3) に基づいて計算した相対誤差を表 6 に示す。表からもわかるように $0[V]$ の際の相対誤差が飛び抜けて大きいことが読み取れる。
- Excel を用いて計算した RMSE を表 7 に示す。[7]
- RMSE の計算式は式 (21)、Excel では式 (22) で計算した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (21)$$

y_i : 観測値 (n 個) \hat{y}_i : 計算値 (n 個)

$$RMSE = SQRT(1/11) * SQRT(SUM(\overline{X_i}^2)) \quad (22)$$

$\overline{X_i}$: X_i での差 (誤差)

4.3 実習 3

•

5 考察

5.1 課題考察

実習 2-1: 理想の“平均値”と“標準偏差”はそれぞれどのような値かを理由とともに考察せよ。

平均値は全体の総和から個々のデータの値を算出するものであるため、表 4 のように、理想の平均値は各データと等しくなるような値であり、標準偏差はデータのばらつきを表しているため、0 に近いものが理想である。理想な状態だと、それぞれの測定値はどのようになっていますか？

0 そのものではなく、
0 に近いのが理想？

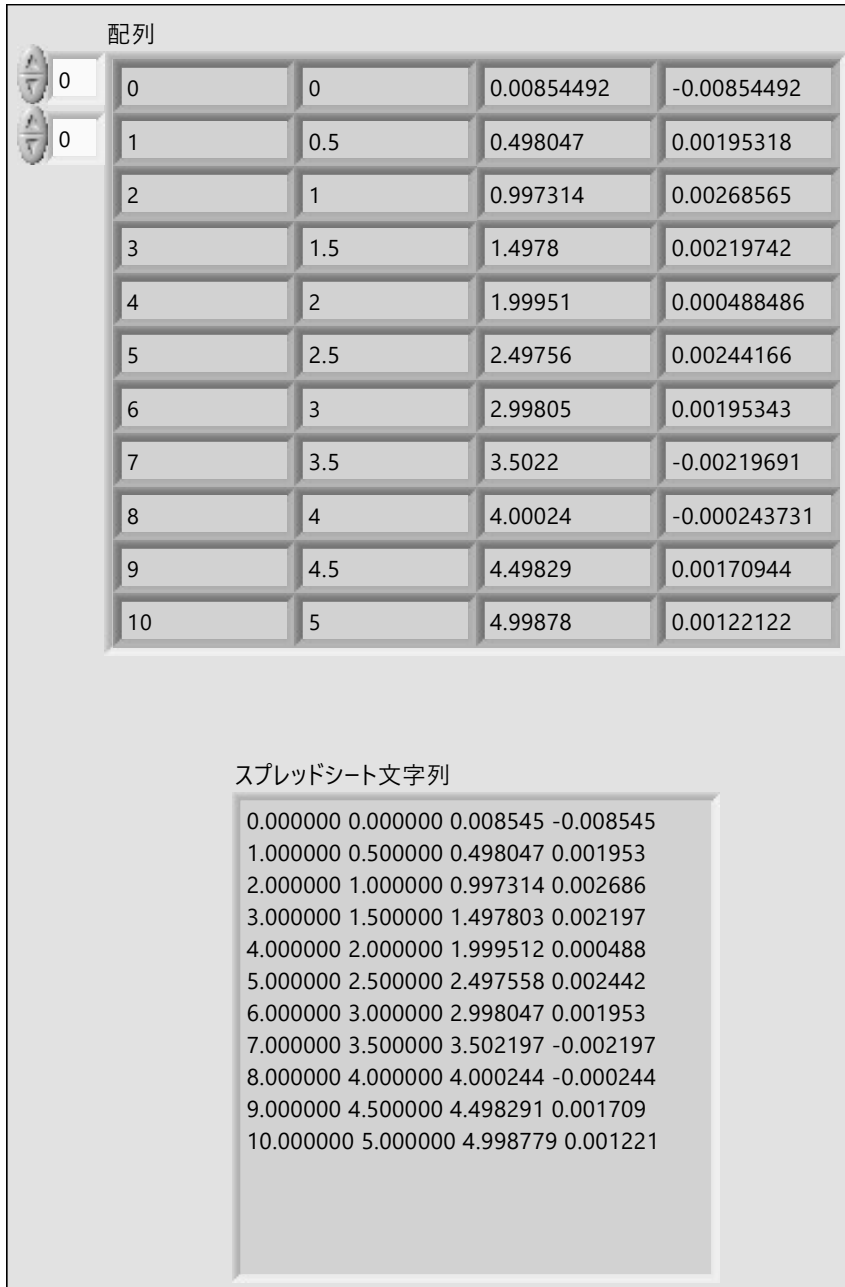


ex22.vi

C:\Users\student\Desktop\m20027\ex22.vi

最終変更日: 2022/05/12、時刻: 15:06

2022/05/12の15:07に印刷



余計な余白は削除する

図 7: 出力電圧変化測定時のフロントパネル

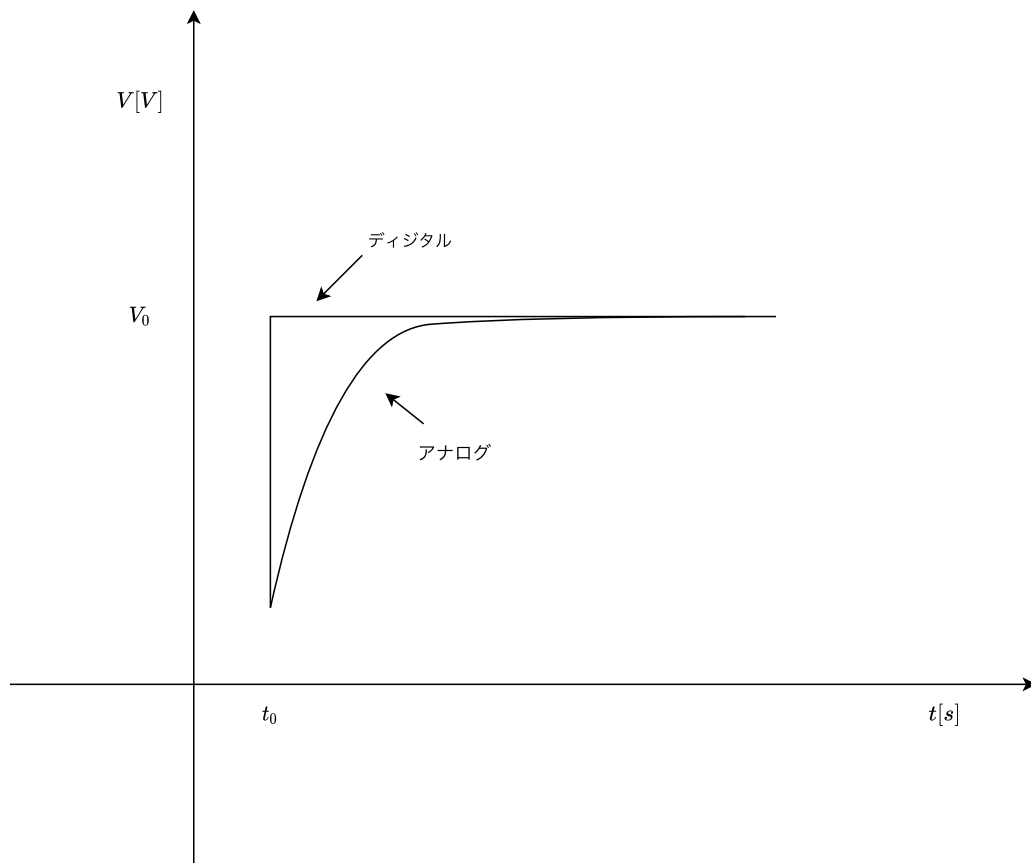


図 8: アナログ処理とデジタル処理の違い

実習 2-2： 出力電圧表示値 (Analog Output に入力した値) と計測電圧値 (Analog Input から出力された値) の関係をグラフにし、近似直線を求めよ。傾きと切片の (理想の) 値を予想し実際の値と比較し考察せよ。

考察は？

5.2 独自考察

- 0[V] で相対誤差が他の電圧測定時と異なり誤差が大きくなったのは、実際に実験をする際にノイズなどの影響により、理論通りに 0[V] にならなかったからだと思われる。よって 0[V] 近傍の計測では、遅延時間の設定が他の測定電圧より長くとる必要があるのではないだろうか。
- どの計測点でも、アナログ電圧を出力しているためアナログ的に電圧が増加するのに対し、今回の計測方法はデジタル方法のため、時間が経ち、電圧が安定してから計測することで誤差の減少が見込まれる。(図 8)

6 結論

参考文献

- [1] 俊. 岩崎 and 電子情報通信学会, 電磁気計測 (電子情報通信レクチャーシリーズ). コロナ社, 2002, pp. 8–9. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000797667922816>.

- [2] 真. 松川 and 大. 小山, はじめて学ぶ電気電子計測. 日刊工業新聞社, 2019, p. 42. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000797042387712>.
- [3] 武. 阿部 and 実. 村山, 電気・電子計測【第4版】, 第4版. 森北出版, 2019, pp. 6–7. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130848328216058496>.
- [4] 統計WEB, “11-4. 確率密度と確率密度関数”, May 2022. [Online]. Available: <https://bellcurve.jp/statistics/course/6602.html>.
- [5] 明. 廣瀬, 電気電子計測[第2版] (新・電気システム工学), 第2版. 数理工学社 and サイエンス社 (発売), 2015, p. 24. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282272174486912>.
- [6] Microsoft, “stdev.s 関数”, May 2022. [Online]. Available: <https://support.microsoft.com/ja-jp/office/stdev-s-%E9%96%A2%E6%95%B0-7d69cf97-0c1f-4acf-be27-f3e83904cc23>.
- [7] biostatistics, “回帰分析の評価指標”, May 2022. [Online]. Available: <https://stats.biopapyrus.jp/glm/lm-evaluation.html>.

表 3: 3.3[V] 接続時の出力電圧

| 測定回数 [回] | 出力電圧 [V] | 測定回数 [回] | 出力電圧 [V] | 測定回数 [回] | 出力電圧 [V] | 測定回数 [回] | 出力電圧 [V] |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 3.262939 | 25 | 3.262939 | 50 | 3.261718 | 75 | 3.262939 |
| 1 | 3.262939 | 26 | 3.262939 | 51 | 3.262939 | 76 | 3.262939 |
| 2 | 3.262939 | 27 | 3.262939 | 52 | 3.262939 | 77 | 3.262939 |
| 3 | 3.262939 | 28 | 3.262939 | 53 | 3.262939 | 78 | 3.262939 |
| 4 | 3.262939 | 29 | 3.262939 | 54 | 3.262939 | 79 | 3.261718 |
| 5 | 3.261718 | 30 | 3.262939 | 55 | 3.262939 | 80 | 3.261718 |
| 6 | 3.261718 | 31 | 3.262939 | 56 | 3.262939 | 81 | 3.262939 |
| 7 | 3.262939 | 32 | 3.262939 | 57 | 3.262939 | 82 | 3.262939 |
| 8 | 3.262939 | 33 | 3.262939 | 58 | 3.262939 | 83 | 3.262939 |
| 9 | 3.262939 | 34 | 3.261718 | 59 | 3.262939 | 84 | 3.262939 |
| 10 | 3.262939 | 35 | 3.261718 | 60 | 3.262939 | 85 | 3.261718 |
| 11 | 3.262939 | 36 | 3.261718 | 61 | 3.262939 | 86 | 3.261718 |
| 12 | 3.262939 | 37 | 3.261718 | 62 | 3.262939 | 87 | 3.262939 |
| 13 | 3.261718 | 38 | 3.261718 | 63 | 3.262939 | 88 | 3.262939 |
| 14 | 3.261718 | 39 | 3.261718 | 64 | 3.262939 | 89 | 3.262939 |
| 15 | 3.261718 | 40 | 3.261718 | 65 | 3.262939 | 90 | 3.262939 |
| 16 | 3.261718 | 41 | 3.262939 | 66 | 3.262939 | 91 | 3.262939 |
| 17 | 3.262939 | 42 | 3.262939 | 67 | 3.262939 | 92 | 3.262939 |
| 18 | 3.262939 | 43 | 3.261718 | 68 | 3.262939 | 93 | 3.262939 |
| 19 | 3.262939 | 44 | 3.261718 | 69 | 3.262939 | 94 | 3.262939 |
| 20 | 3.262939 | 45 | 3.261718 | 70 | 3.262939 | 95 | 3.262939 |
| 21 | 3.262939 | 46 | 3.261718 | 71 | 3.261718 | 96 | 3.262939 |
| 22 | 3.261718 | 47 | 3.262939 | 72 | 3.261718 | 97 | 3.262939 |
| 23 | 3.261718 | 48 | 3.262939 | 73 | 3.261718 | 98 | 3.261718 |
| 24 | 3.262939 | 49 | 3.261718 | 74 | 3.261718 | 99 | 3.261718 |

表 4: 5[V] 接続時の出力電圧

| 測定回数 [回] | 出力電圧 [V] | 測定回数 [回] | 出力電圧 [V] | 測定回数 [回] | 出力電圧 [V] | 測定回数 [回] | 出力電圧 [V] |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 4.998779 | 25 | 4.998779 | 50 | 4.998779 | 75 | 4.998779 |
| 1 | 4.998779 | 26 | 4.998779 | 51 | 4.998779 | 76 | 4.998779 |
| 2 | 4.998779 | 27 | 4.998779 | 52 | 4.998779 | 77 | 4.998779 |
| 3 | 4.998779 | 28 | 4.998779 | 53 | 4.998779 | 78 | 4.998779 |
| 4 | 4.998779 | 29 | 4.998779 | 54 | 4.998779 | 79 | 4.998779 |
| 5 | 4.998779 | 30 | 4.998779 | 55 | 4.998779 | 80 | 4.998779 |
| 6 | 4.998779 | 31 | 4.998779 | 56 | 4.998779 | 81 | 4.998779 |
| 7 | 4.998779 | 32 | 4.998779 | 57 | 4.998779 | 82 | 4.998779 |
| 8 | 4.998779 | 33 | 4.998779 | 58 | 4.998779 | 83 | 4.998779 |
| 9 | 4.998779 | 34 | 4.998779 | 59 | 4.998779 | 84 | 4.998779 |
| 10 | 4.998779 | 35 | 4.998779 | 60 | 4.998779 | 85 | 4.998779 |
| 11 | 4.998779 | 36 | 4.998779 | 61 | 4.998779 | 86 | 4.998779 |
| 12 | 4.998779 | 37 | 4.998779 | 62 | 4.998779 | 87 | 4.998779 |
| 13 | 4.998779 | 38 | 4.998779 | 63 | 4.998779 | 88 | 4.998779 |
| 14 | 4.998779 | 39 | 4.998779 | 64 | 4.998779 | 89 | 4.998779 |
| 15 | 4.998779 | 40 | 4.998779 | 65 | 4.998779 | 90 | 4.998779 |
| 16 | 4.998779 | 41 | 4.998779 | 66 | 4.998779 | 91 | 4.998779 |
| 17 | 4.998779 | 42 | 4.998779 | 67 | 4.998779 | 92 | 4.998779 |
| 18 | 4.998779 | 43 | 4.998779 | 68 | 4.998779 | 93 | 4.998779 |
| 19 | 4.998779 | 44 | 4.998779 | 69 | 4.998779 | 94 | 4.998779 |
| 20 | 4.998779 | 45 | 4.998779 | 70 | 4.998779 | 95 | 4.998779 |
| 21 | 4.998779 | 46 | 4.998779 | 71 | 4.998779 | 96 | 4.998779 |
| 22 | 4.998779 | 47 | 4.998779 | 72 | 4.998779 | 97 | 4.998779 |
| 23 | 4.998779 | 48 | 4.998779 | 73 | 4.998779 | 98 | 4.998779 |
| 24 | 4.998779 | 49 | 4.998779 | 74 | 4.998779 | 99 | 4.998779 |

表 5: Excel を用いて算出された平均値と標準偏差 表の列と行を逆にする
縦方向に、同じ種類の値が並ぶ。

| 算出値 \ 接続先 | GND | 3.3[V] | 5[V] |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| 平均値 | 0.00636 | 3.26256 | 4.998779 |
| 標準偏差 - 推定値 | 0.000499 | 0.000568 | 9.81918E-15 |
| 標準偏差 - 計算値 | 0.000499419 | 0.000567549 | 9.81918E-15 |

E-15の表現は使用しない

表 6: 電圧変化測定時の相対誤差

| 電圧 [V] | 相対誤差 [-] |
|--------|--------------|
| 0 | -1 |
| 0.5 | 0.006388555 |
| 1 | 0.002693234 |
| 1.5 | 0.002283871 |
| 2 | 0.000855231 |
| 2.5 | -0.000487762 |
| 3 | 0.000244393 |
| 3.5 | 6.97191E-05 |
| 4 | -0.000365866 |
| 4.5 | 0.000108678 |
| 5 | 0.00024426 |

表 7: 電圧変化測定時の RMSE

| 電圧 | 二乗平均平方根誤差 | 単位なし |
|-----|-------------|------|
| 0 | 0.002576414 | |
| 0.5 | 0.000956997 | |
| 1 | 0.000809859 | |
| 1.5 | 0.001030566 | |
| 2 | 0.000515283 | |
| 2.5 | 0.000367844 | |
| 3 | 0.000221008 | |
| 3.5 | 7.35688E-05 | |
| 4 | 0.000441413 | |
| 4.5 | 0.000147439 | |
| 5 | 0.000368145 | |