

第3学年 電気電子工学実験実習報告書

1

電気電子計測

実験日 令和4年7月14日(木)
令和4年7月21日(木)

班	学生番号	氏名
2 班	3314	城戸 貴博

共同実験者名

提出日			備考	評価
予定日	7/21	7/28		
提出日				

1 目的

本実験では以下の3つが目的である。

- LabVIEW と 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。

2 原理

2.1 LabVIEW

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イ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（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を内蔵する組み込み評価ボードである。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）

2.4.1 真値

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 [2]。

2.4.2 誤差及び相対誤差

誤差は式 (1) で定義される [2]。

$$(\text{誤差}) = (\text{測定値}) - (\text{真値}) \quad (1)$$

また、相対誤差とは真値に対する誤差の比である。但し真値は分からないので、通常は式 (2) 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 [2]。

$$(\text{相対誤差}) = \frac{(\text{誤差})}{(\text{真値})} \simeq \frac{(\text{誤差})}{(\text{測定値})} \quad (2)$$

2.5 統計処理（平均値・標準偏差・正規分布）

2.5.1 平均値

平均値は一般的に算術平均が使われる。平均を求めるときは適切な計算を用いることで、正しくデータを扱うことができる。また平均値には以下のような特性がある [1]。

平均値というのは、データの分布の中から 1 点を取り出したものにすぎず、データがその周辺にどれくらい広がっている、あるいは散らばっているのかは、わからないのです。

- 算術平均

N 個のデータの総和をデータの数 N 個で割って得られる値で、式 (3) で表すことができる [1]。

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (3)$$

- 相乗平均 (幾何平均)

N 個のデータがあるとき、そのデータの積 (総乗) を N 乗根することで得られる値で、式 (4) で表すことができる [1]。成長率を平均する場合などで使われる。具体的には、ある企業の N 年間の売り上げの伸びから 1 年間あたりの売り上げの伸びを計算する際に使われる。

$$\bar{y} = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N y_i} \quad (4)$$

- 二乗平均

N 個のデータがあるとき、各データを二乗したものの総和を N で割り、平方根を取ることで得られる値で、式 (5) で表すことができる [1]。偏差から標準偏差を求める際に用いる。

$$\bar{y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{N}} \quad (5)$$

- 調和平均

N 個のデータがあるとき、逆数の算術平均の逆数のことで、式 (6) で表すことができる [5]。

$$\bar{y} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{y_i}} \quad (6)$$

2.5.2 偏差

偏差 (deviation) とは各データが平均値からどのくらい大きいか, あるいは小さいかを表すものである [1]。また偏差の算術平均はゼロになるという特性があり, 式 (7) で証明できる [1]。

$$\begin{aligned}(\text{偏差の平均}) &= \frac{(\text{偏差の合計})}{(\text{データ数})} \\&= \frac{[(\text{データ}) - (\text{平均値})] \text{ の合計}}{(\text{データ数})} \\&= \frac{\{(\text{データ}) \text{ の合計} - (\text{平均値}) \times (\text{データ数})\}}{(\text{データ数})} \\&= \frac{(\text{データ}) \text{ の合計}}{(\text{データ数})} - \frac{(\text{平均値}) \times (\text{データ数})}{(\text{データ数})} \\&= (\text{平均値}) - (\text{平均値}) \\&= 0\end{aligned}\tag{7}$$

2.5.3 標準偏差

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 (8) で表すことができる。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}\tag{8}$$

また標準偏差には以下のような特性がある [1]。

(平均値を基点にして広がるデータの) 広がりを評価するのが標準偏差である。標準偏差は, データたちの平均値からの離れ方を平均化したものである。そのとき, 大きいほうに離れようが, 小さいほうに離れようが, どちらも正の数として評価し, 打ち消し合わないようになら平均化されている。

2.5.4 正規分布

左右対称の釣鐘型に値が分布しているのを正規分布といい, 山の頂点に平均値がくる。標準正規分布では, $+1$ -1 の範囲のデータの相対度数は 0.6826 で, $+2$ -2 の範囲のデータの相対度数は 0.9544 であり, $+2$ -2 の範囲に 95% ほどのデータが分布している [1]。

2.6 近似直線 (最小二乗法)

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,

$$y = ax + b\tag{9}$$

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

$$\begin{aligned}
 E &= \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 \\
 &= \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2 \\
 &= \sum_{i=1}^N (y_i - (ax_i + b))^2
 \end{aligned} \tag{10}$$

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 [2]。

$$\frac{\partial}{\partial a} E(a, b) = 0 \tag{11}$$

$$\frac{\partial}{\partial b} E(a, b) = 0 \tag{12}$$

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 [6]。

$$a = \frac{\sum_{n=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{n=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{13}$$

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

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。

表 1: 使用器具

使用器具名	製造元	型番	製造番号 (管理番号)
パソコン	Mouse Computer	NK50SZ	NKNK50SZ0000K00191
ソフトウェア	National Instruments	LabVIEW 2019	ver. 19.0.1f3 (32bit)
組込デバイス	National Instruments	MYRIO-1900	3096DCE
ブレッドボード	Digilent	MXP Breadboard for myRIO	D52467

3.2 実習 2 アナログ電圧値の計測と出力

3.2.1 実習 2-1 電圧値の計測

アナログ電圧値の計測

- 図 1 の回路をブレッドボード上に作成し，myRIO に接続した。
- ブロックダイアグラム上で，Channel に“A/AI 0 (pin3)”を選択した“Analog Input”ブロックを用いて，値を表示するプログラムを作成した。
- プログラムを実行し，正しい値が出力されていることを確認した。
- 手順 c を GND，3.3 V，5 V についてそれぞれ繰り返した。

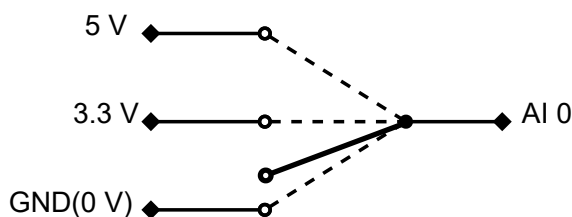


図 1: 電圧値の計測で用いた回路

For ループ

- “アナログ電圧値の計測”で作成したプログラムを“For ループ”で囲むように配置し，5 回繰り返すプログラムを作成した。
- 実行のハイライトを選択した状態で，プログラムを実行し A/AI0 と i の値が正しく変化していることを確認した。
- 配列に出力するように変更し，プログラムを実行し A/AI0 の値が正しく表示されることを確認した。

配列連結追加・配列からスプレッドシート文字列に変換

- “配列連結追加”ブロックを用いて、複数の変数を表示できるようにし、値が正しく表示されることを確認した。
- “配列からスプレッドシート文字列に変換”ブロックを用いて、配列データを一括でコピーできるようにした。
- プログラムを実行して得られたデータを、Excel にコピ&ペーストできることを確認した。

実習 2-1 課題実験

- “実習 2-1 電圧値の計測”で作成したプログラムを 100 回実行するようにした。
- GND, 3.3 V, 5 V についてそれぞれ実行し記録した。
- それぞれ平均値と標準偏差を求めた。

3.2.2 実習 2-2 電圧出力

アナログ電圧出力

- 図 2 の回路をブレッドボード上に作成し、myRIO に接続した。
- “Analog Input”ブロックを用いて、“A/AI 0 (pin3)”のアナログ電圧値を計測するプログラムを作成した。
- “Analog Output”ブロックを用いて、“A/AO 0 (pin2)”からアナログ電圧を出力するプログラムを追加した。
- “Analog Output”に接続された“制御器”に値を入力し、A/AI0 の値が正しく表示されることを確認した。

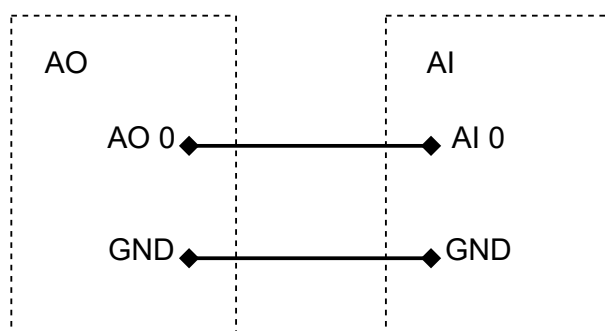


図 2: アナログ電圧の出力・計測で用いた回路

出力電圧値を 0 V から 4 V まで 1 V ずつ変化させる

- “アナログ電圧出力”で作成したプログラムを“For ループ”を用いて、5 回繰り返すように変更した。
- “遅延時間”を用いて、電圧出力から電圧計測の間に遅延時間ができるように変更した。
- 遅延時間を 0, 0.005, 0.050, 0.500 に変え、出力結果を観察した。

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プログラムを作成した。
- b. プログラムを実行し，以下の値を記録した。
 - カウンタ変数 i
 - 出力電圧表示値
 - 計測電圧値
 - 差
- c. “差（＝誤差）” から二乗平均平方誤差を Excel を用いて求めた。

3.3 実習 3 素子の電圧電流特性

図 3 は素子の電圧電流特性を計測する際に用いた回路である。 R_0 , 計測対象素子を変更し, 電圧電流特性を測定する。

myRIO は AI0 と AI1 の電圧を計測することができる。実験手順 実習 3-X における「計測した」は「プログラムを実行し, AI0 と AI1 の電圧を計測した」ことを示す。AI0 は $V_{AO}(= V_{R_0} + V_U)$ [V] を計測でき, AI1 は V_U [V] を計測できる。電圧 V_{R_0} は抵抗 R_0 にかかる電圧であり, $V_{R_0} = V_{AO} - V_U$ で計算される。電圧 V_U は素子にかかる電圧であり, 電流 I_U は素子に流れる電流である。電流 I_U は電圧 V_{R_0} と抵抗 R_0 から下式で計算できる。

$$I_U = \frac{V_{R_0}}{R_0} \quad (15)$$

電圧電流特性のグラフは, 横軸が計測対象素子にかかる電圧, 縦軸が計測対象素子を通る電流である。よって, $V_U - I_U$ グラフで示される。

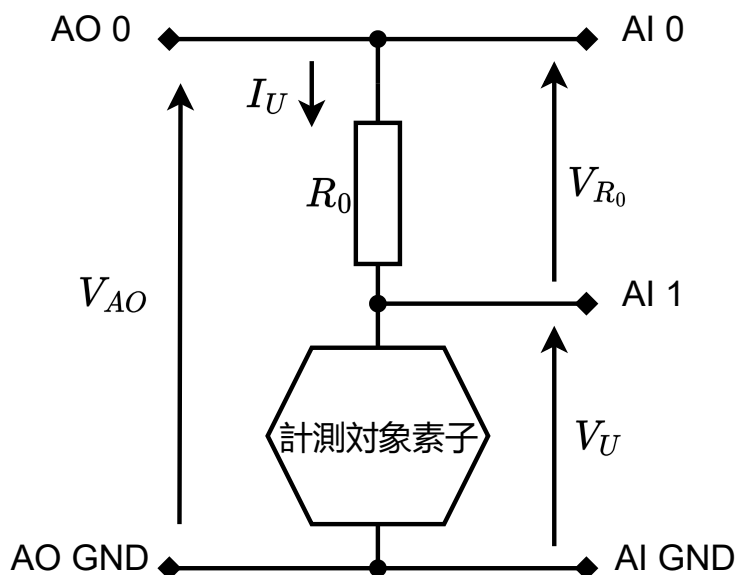


図 3: 電圧電流特性の計測に用いた回路

3.3.1 実習 3-1 固定抵抗の電圧電流特性

- 測定対象素子を固定抵抗 $1\text{ k}\Omega$ にし図 3 を作成した。
- R_0 の抵抗値を $100\ \Omega$ にし, 計測した。
- R_0 の抵抗値が $1\text{ k}\Omega$, $10\text{ k}\Omega$, $100\text{ k}\Omega$ の場合についても計測した。

3.3.2 実習 3-2 可変抵抗の電圧電流特性

- R_0 の抵抗値を $10\text{ k}\Omega$ にし図 3 を作成した。
- 測定対象素子を可変抵抗の端子 1-2 間にし, つまみの平らな面を A 方向に向けて計測した。
- B 方向, C 方向についても計測した。
- 上記の 3 方向についての計測を端子 2-3 間, 端子 3-1 間についても計測した。

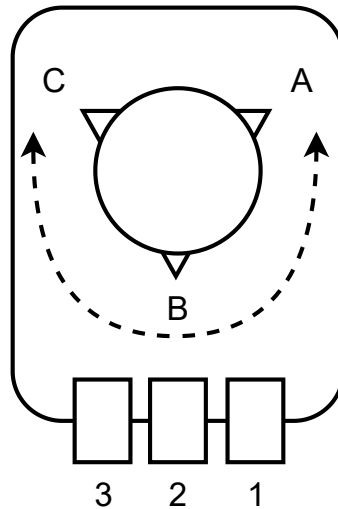


図 4: 可変抵抗の端子と方向

3.3.3 実習 3-3 CdS センサ (光センサ) の電圧電流特性

- R_0 の抵抗値を $10\text{ k}\Omega$ にし図 3 を作成した。
- 測定対象素子を CdS センサにした。
- センサをハンカチで覆い暗くした場合と、何もしなかった場合 (部屋の明るさ), スマートフォンのライトを照射し明るくした場合について計測した。

3.3.4 実習 3-4 カセンサ (感圧センサ) の電圧電流特性

- R_0 の抵抗値を $10\text{ k}\Omega$ にし図 3 を作成した。
- 測定対象素子を力センサにした。
- 力を加えない場合と感圧部を強くつまんだ場合について計測した。

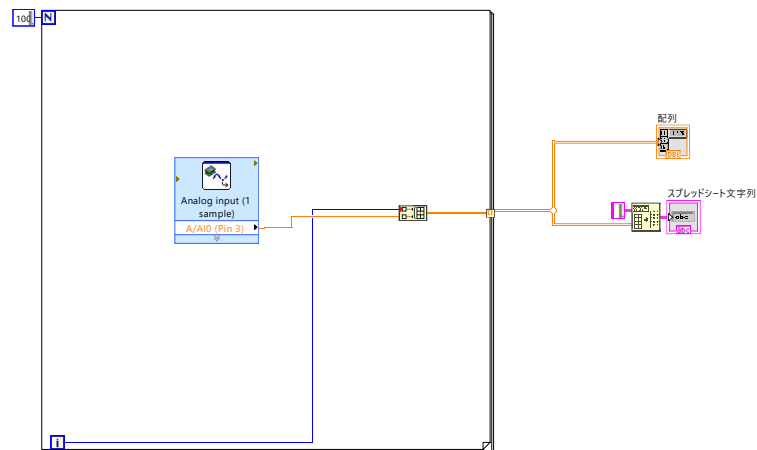
3.3.5 実習 3-5 発光ダイオード (LED) の電圧電流特性

- R_0 の抵抗値を $1\text{ k}\Omega$ にし図 3 を作成した。
- 測定対象素子を赤色の発光ダイオード (LED) にし, 計測した。
- 他の色 (白, 緑, 青, 紫) についても計測した。

4 結果

4.1 実習 2-1 課題実験

GND, 3.3 V, 5 V の出力電圧を 100 回ずつ計測するのに用いたプログラムを プログラム 1 に示す。
プログラムを実行した後のフロントパネルを図 5 に示す。



プログラム 1: 100 回計測するのに用いたプログラム

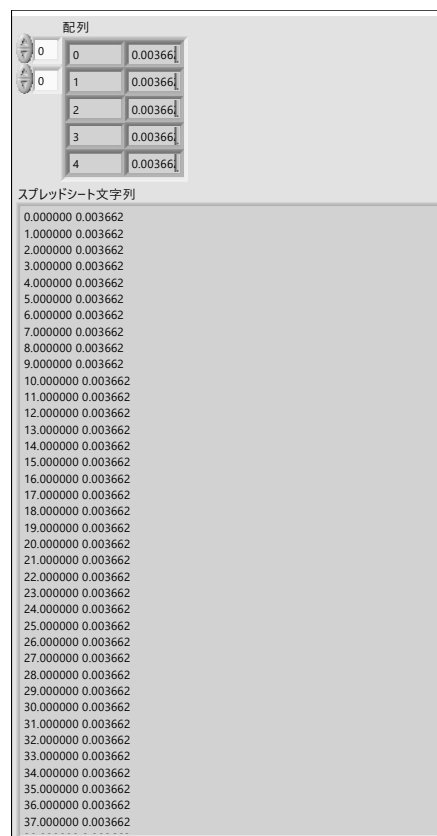


図 5: 100 回計測した後のフロントパネル

GND, 3.3V, 5V の出力電圧を 100 回ずつ計測した結果を表 2, 表 3, 表 4 に示す。

表 2: 100 回分の計測電圧 (GND)

計測回数 [回]	計測電圧 [V]	計測回数 [回]	計測電圧 [V]	計測回数 [回]	計測電圧 [V]	計測回数 [回]	計測電圧 [V]
0	0.003662	25	0.003662	50	0.003662	75	0.003662
1	0.003662	26	0.003662	51	0.003662	76	0.003662
2	0.003662	27	0.003662	52	0.003662	77	0.003662
3	0.003662	28	0.003662	53	0.003662	78	0.003662
4	0.003662	29	0.003662	54	0.003662	79	0.003662
5	0.003662	30	0.003662	55	0.003662	80	0.003662
6	0.003662	31	0.003662	56	0.003662	81	0.003662
7	0.003662	32	0.003662	57	0.003662	82	0.003662
8	0.003662	33	0.003662	58	0.003662	83	0.003662
9	0.003662	34	0.003662	59	0.003662	84	0.003662
10	0.003662	35	0.003662	60	0.003662	85	0.003662
11	0.003662	36	0.003662	61	0.003662	86	0.003662
12	0.003662	37	0.003662	62	0.003662	87	0.003662
13	0.003662	38	0.003662	63	0.003662	88	0.003662
14	0.003662	39	0.003662	64	0.003662	89	0.003662
15	0.003662	40	0.003662	65	0.003662	90	0.003662
16	0.003662	41	0.003662	66	0.003662	91	0.003662
17	0.003662	42	0.003662	67	0.003662	92	0.003662
18	0.003662	43	0.003662	68	0.003662	93	0.003662
19	0.003662	44	0.003662	69	0.003662	94	0.003662
20	0.003662	45	0.003662	70	0.003662	95	0.003662
21	0.003662	46	0.003662	71	0.003662	96	0.003662
22	0.003662	47	0.003662	72	0.003662	97	0.003662
23	0.003662	48	0.003662	73	0.003662	98	0.003662
24	0.003662	49	0.003662	74	0.003662	99	0.003662

表 3: 100 回分の計測電圧 (3.3 V)

計測回数 [回]	計測電圧 [V]	計測回数 [回]	計測電圧 [V]	計測回数 [回]	計測電圧 [V]	計測回数 [回]	計測電圧 [V]
0	3.259277	25	3.259277	50	3.258056	75	3.259277
1	3.259277	26	3.259277	51	3.259277	76	3.259277
2	3.259277	27	3.259277	52	3.259277	77	3.259277
3	3.259277	28	3.259277	53	3.259277	78	3.259277
4	3.259277	29	3.259277	54	3.259277	79	3.259277
5	3.258056	30	3.259277	55	3.259277	80	3.259277
6	3.258056	31	3.259277	56	3.258056	81	3.259277
7	3.259277	32	3.259277	57	3.258056	82	3.259277
8	3.259277	33	3.259277	58	3.258056	83	3.259277
9	3.259277	34	3.259277	59	3.259277	84	3.259277
10	3.259277	35	3.259277	60	3.259277	85	3.259277
11	3.259277	36	3.259277	61	3.259277	86	3.259277
12	3.259277	37	3.259277	62	3.259277	87	3.259277
13	3.259277	38	3.259277	63	3.259277	88	3.259277
14	3.259277	39	3.259277	64	3.259277	89	3.258056
15	3.259277	40	3.259277	65	3.259277	90	3.258056
16	3.259277	41	3.259277	66	3.259277	91	3.258056
17	3.259277	42	3.259277	67	3.259277	92	3.259277
18	3.259277	43	3.259277	68	3.259277	93	3.259277
19	3.259277	44	3.259277	69	3.259277	94	3.259277
20	3.259277	45	3.259277	70	3.259277	95	3.259277
21	3.259277	46	3.259277	71	3.258056	96	3.259277
22	3.259277	47	3.259277	72	3.258056	97	3.259277
23	3.259277	48	3.258056	73	3.258056	98	3.259277
24	3.259277	49	3.258056	74	3.259277	99	3.259277

表 4: 100 回分の計測電圧 (5 V)

計測回数 [回]	計測電圧 [V]	計測回数 [回]	計測電圧 [V]	計測回数 [回]	計測電圧 [V]	計測回数 [回]	計測電圧 [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

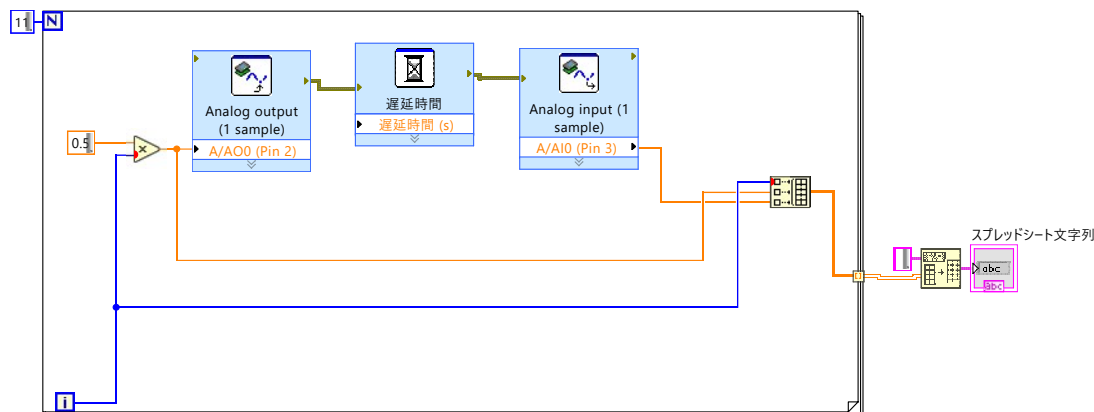
GND, 3.3 V, 5 V それぞれの平均値と標準偏差を表 5 に示す。入力が 3.3 V の標準偏差は他の入力の標準偏差よりも大きい。どの標準偏差も 1 mV までは信頼できると考えられる。

表 5: 平均値と標準偏差

入力	平均値 [V]	標準偏差 [V]
5 V	4.998779	9.76996×10^{-15}
3.3 V	3.259106	4.23671×10^{-4}
GND(0 V)	0.003662	8.67362×10^{-19}

4.2 実習 2-2 課題実験

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プログラムを プログラム 2 に示す。プログラムを実行した後のフロントパネルを図 6 に示す。0 V から 5 V まで 0.5 V 刻みであることから、11 回計測する必要があると分かる。



プログラム 2: 0.5 V 刻みの計測に用いたプログラム

スプレッドシート文字列		
0.000000	0.000000	0.007324
1.000000	0.500000	0.499268
2.000000	1.000000	0.997314
3.000000	1.500000	1.501465
4.000000	2.000000	1.998291
5.000000	2.500000	2.502441
6.000000	3.000000	3.001709
7.000000	3.500000	3.502197
8.000000	4.000000	4.002685
9.000000	4.500000	4.499511
10.000000	5.000000	4.998779

図 6: 0.5 V 刻みの計測した後のフロントパネル

プログラムを実行し、記録した値を表 6 に示す。

二乗平均平方根誤差 (RMSE) は下式で求めた [7]。 n はデータの総数, y_i は計測値, \hat{y}_i は理想値である。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (16)$$

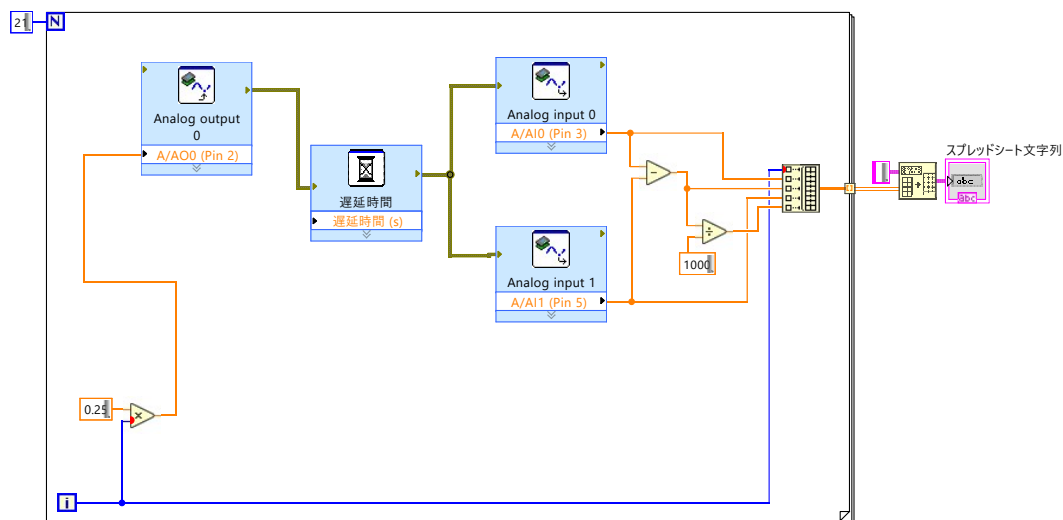
計算した二乗平均平方根誤差は 0.002643715 V であった。

表 6: カウント・出力電圧・計測電圧・差

カウンタ	出力電圧 [V]	計測電圧 [V]	差 [V]
0	0	0.007324	0.007324
1	0.5	0.500488	0.000488
2	1	0.998535	-0.00147
3	1.5	1.500244	0.000244
4	2	1.998291	-0.00171
5	2.5	2.50122	0.00122
6	3	3.001709	0.001709
7	3.5	3.500976	0.000976
8	4	4.002685	0.002685
9	4.5	4.501953	0.001953
10	5	4.998779	-0.00122

4.3 実習 3 素子の電圧電流特性

実習 3 で電圧電流特性を計測するのに用いたプログラムを プログラム 3 に示す。このプログラムは 0V から 5V まで 0.25V 刻みで出力電圧を変え、カウント数, V_{AO} , V_{R_0} , V_U , I_U を出力するプログラムである。実験ごとに右中央にある商ブロックの分母 (数値制御器の値) を変更した。この値はそのときの R_0 の抵抗値を入力した。プログラムを実行した後のフロントパネルを図 7 に示す。



プログラム 3: 素子の電圧電流特性の計測に用いたプログラム

スプレッドシート文字列					
0.000000	0.007324	0.002441	0.004883	2.441406E-6	
1.000000	0.246582	-0.004883	0.251465	-4.882812E-6	
2.000000	0.498047	-0.004883	0.502930	-4.882812E-6	
3.000000	0.750732	0.002441	0.748291	2.441406E-6	
4.000000	0.999756	0.000000	0.999756	0.000000	
5.000000	1.252441	0.004883	1.247558	4.882812E-6	
6.000000	1.500244	0.000000	1.500244	0.000000	
7.000000	1.750488	0.002441	1.748047	2.441406E-6	
8.000000	1.998291	0.000000	1.998291	0.000000	
9.000000	2.250976	0.003662	2.247314	3.662109E-6	
10.000000	2.501220	0.004883	2.496338	4.882812E-6	
11.000000	2.750244	0.013428	2.736816	1.342773E-5	
12.000000	3.000488	0.141602	2.858886	0.000142	
13.000000	3.248291	0.345459	2.902832	0.000345	
14.000000	3.499756	0.571289	2.928466	0.000571	
15.000000	3.751220	0.803223	2.947998	0.000803	
16.000000	3.999023	1.033935	2.965088	0.001034	
17.000000	4.250488	1.270752	2.979736	0.001271	
18.000000	4.499511	1.507568	2.991943	0.001508	
19.000000	4.746093	1.741943	3.004150	0.001742	
20.000000	4.993896	1.978760	3.015136	0.001979	

図 7: 素子の電圧電流特性の計測した後のフロントパネル

4.4 実習 3-1 固定抵抗の電圧電流特性

固定抵抗の電圧電流特性 ($R_0 = 100\ \Omega, 1\ \text{k}\Omega, 10\ \text{k}\Omega, 100\ \text{k}\Omega$) の計測結果を $V_U - I_U$ グラフにしたものを図 8 に示す。 R_0 が変化しても、傾きは一定である。

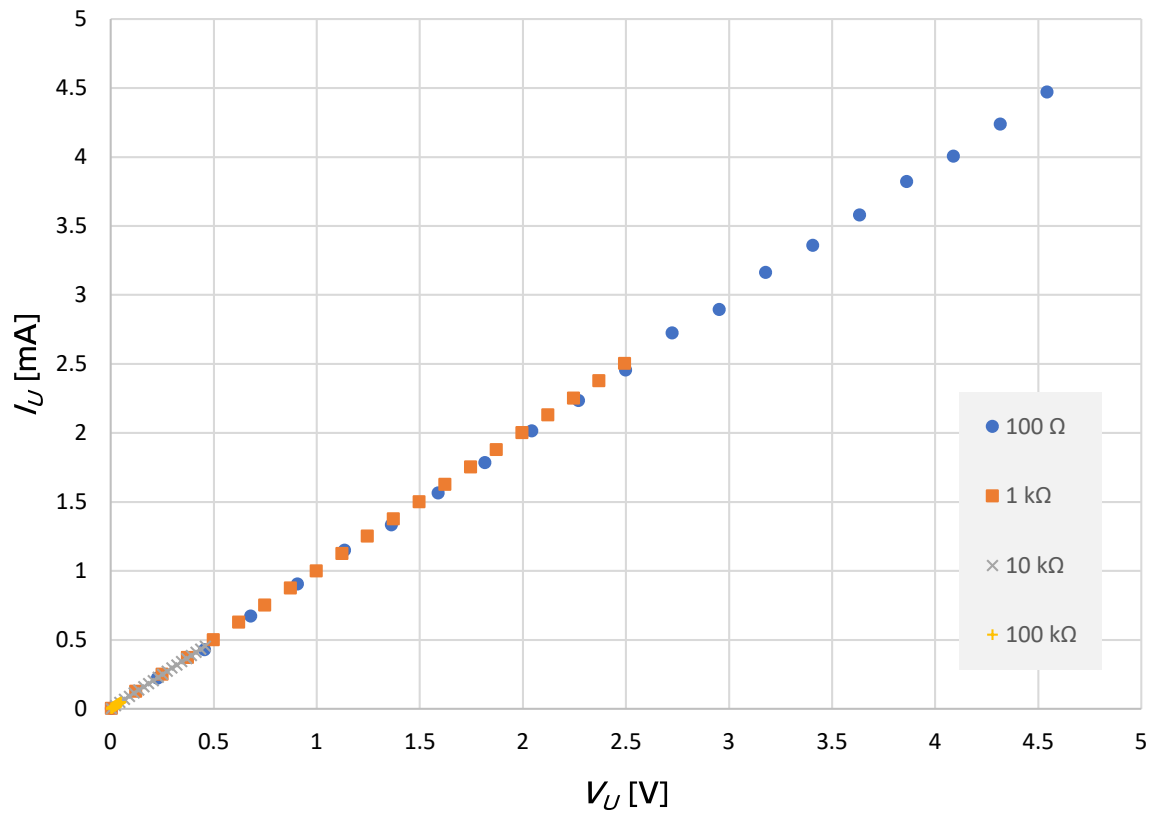


図 8: 固定抵抗の電圧電流特性

4.5 実習 3-2 可変抵抗の電圧電流特性

可変抵抗の電圧電流特性の端子 1-2 間の計測結果を $V_U - I_U$ グラフにしたものを図 9 , 端子 2-3 間を図 10 , 端子 3-1 間を図 11 に示す。端子 1-2 間では A 方向で傾きが最小になり, C 方向で傾きが最大になっている。端子 2-3 間では C 方向で傾きが最小になり, A 方向で傾きが最大になっている。端子 3-1 間ではどの方向でも傾きが同じである。

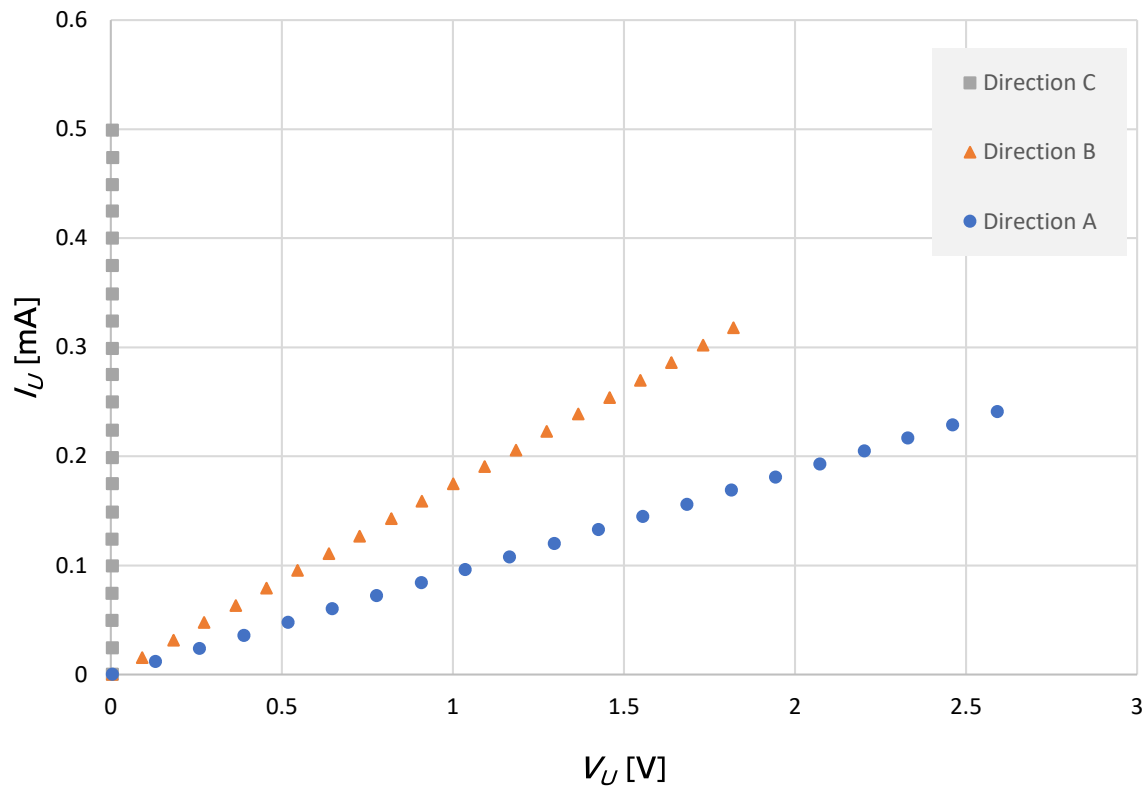


図 9: 可変抵抗の電圧電流特性 (端子 1-2 間)

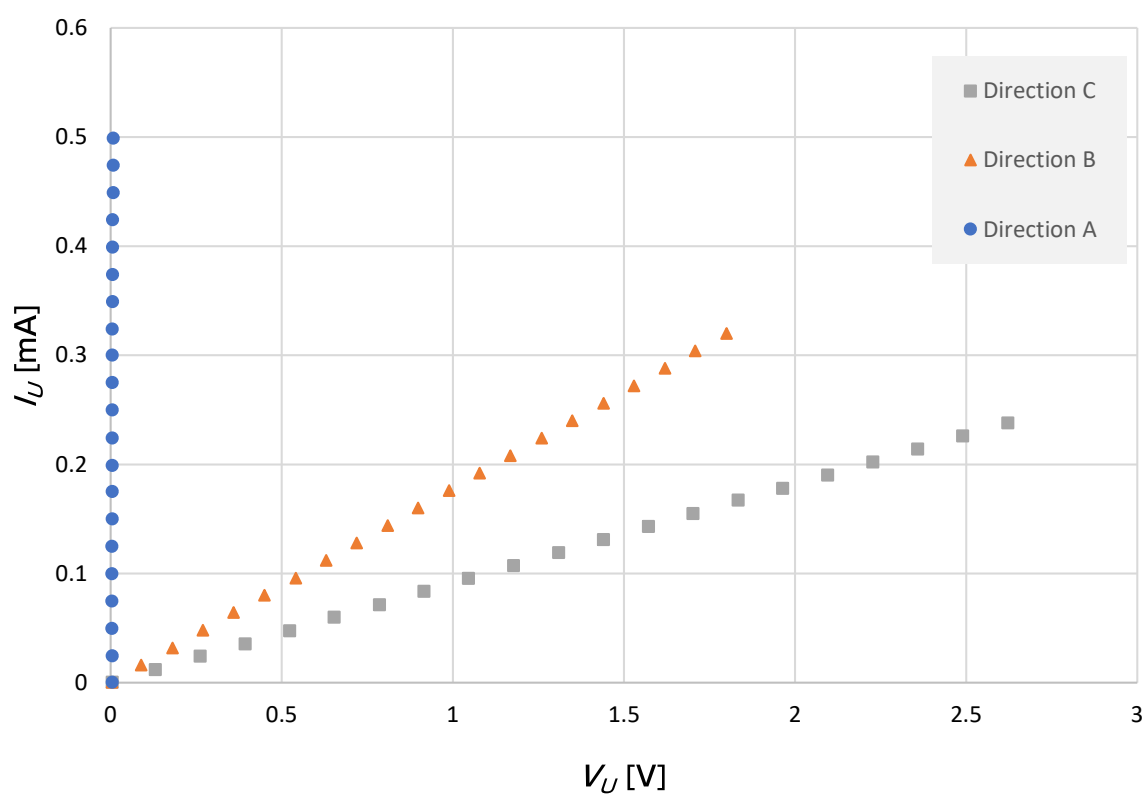


図 10: 可変抵抗の電圧電流特性 (端子 2-3 間)

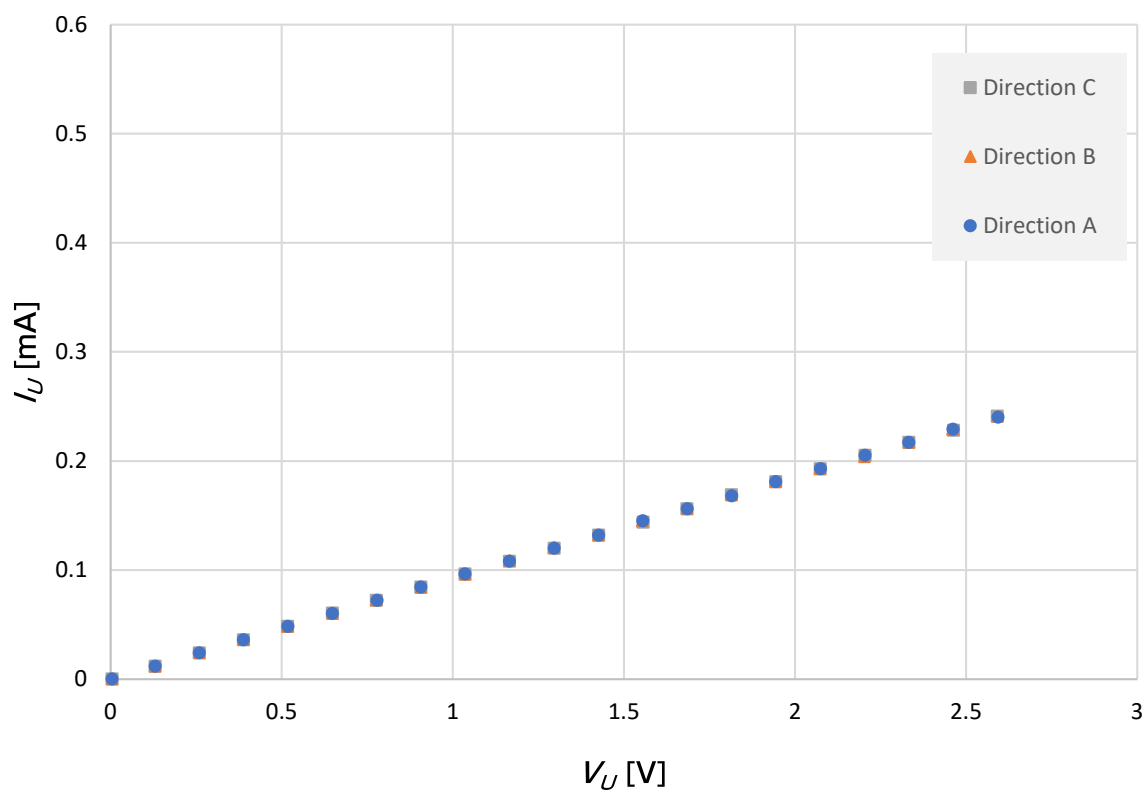


図 11: 可変抵抗の電圧電流特性 (端子 3-1 間)

4.6 実習 3-3 CdS センサ (光センサ) の電圧電流特性

CdS センサ (光センサ) の電圧電流特性を $V_U - I_U$ グラフにしたものを図 12 に示す。暗い場合で傾きが最小になり、最も明るい場合で傾きが最大になる。

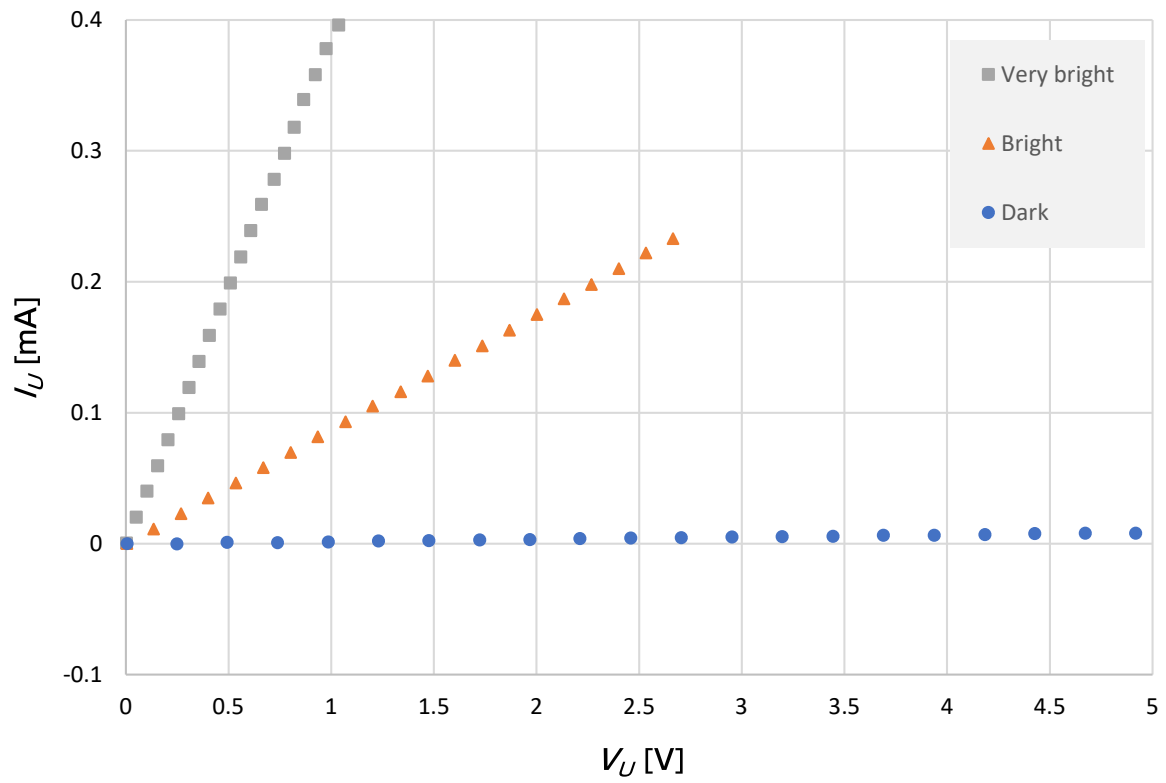


図 12: CdS センサ (光センサ) の電圧電流特性

4.7 実習 3-4 カセンサ (感圧センサ) の電圧電流特性

カセンサ (感圧センサ) の電圧電流特性 $V_U - I_U$ グラフにしたものを図 13 に示す。力を加えない場合で傾きが最小になり、感圧部を強くつまんだ場合で傾きが最大になる。

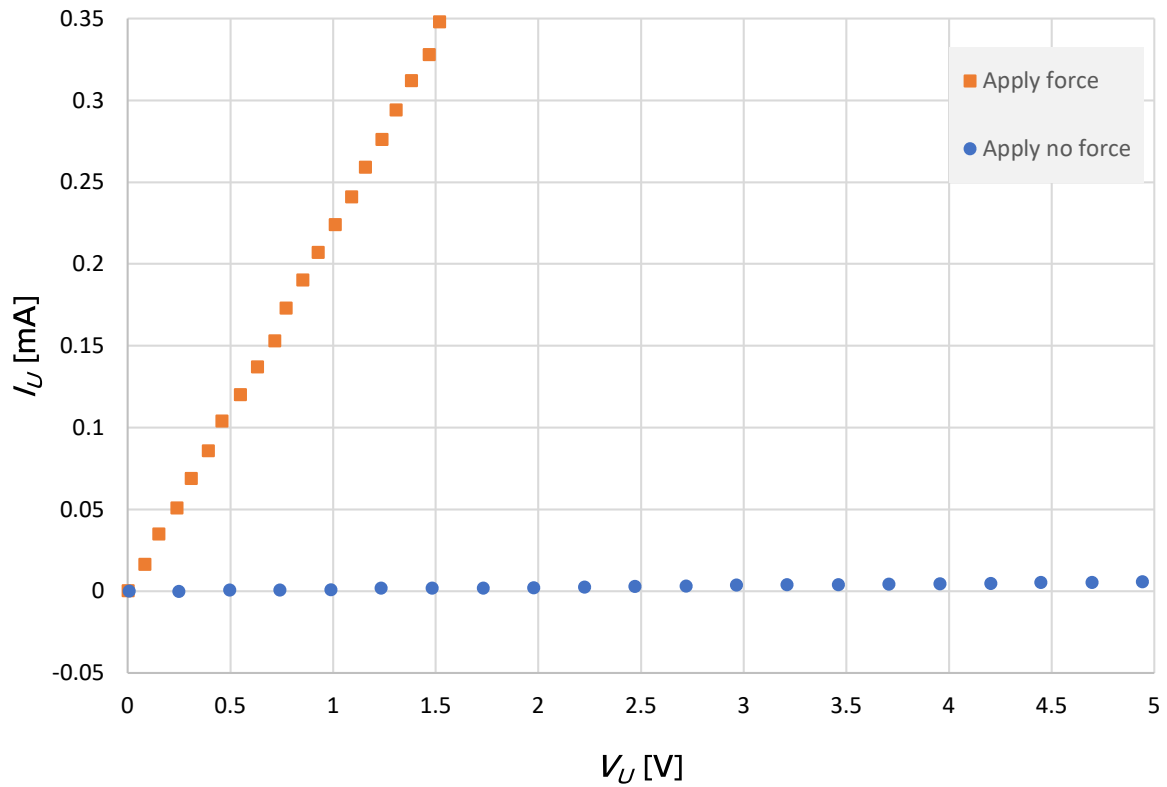


図 13: カセンサ (感圧センサ) の電圧電流特性

4.8 実習 3-5 発光ダイオード (LED) の電圧電流特性

複数の色 (赤, 白, 緑, 青, 紫) の発光ダイオード (LED) の電圧電流特性 $V_U - I_U$ グラフにしたものを図 14 に示す。赤色 LED が最も低い電圧で電流から流し, 紫色 LED が最も高い電圧から電流を流している。

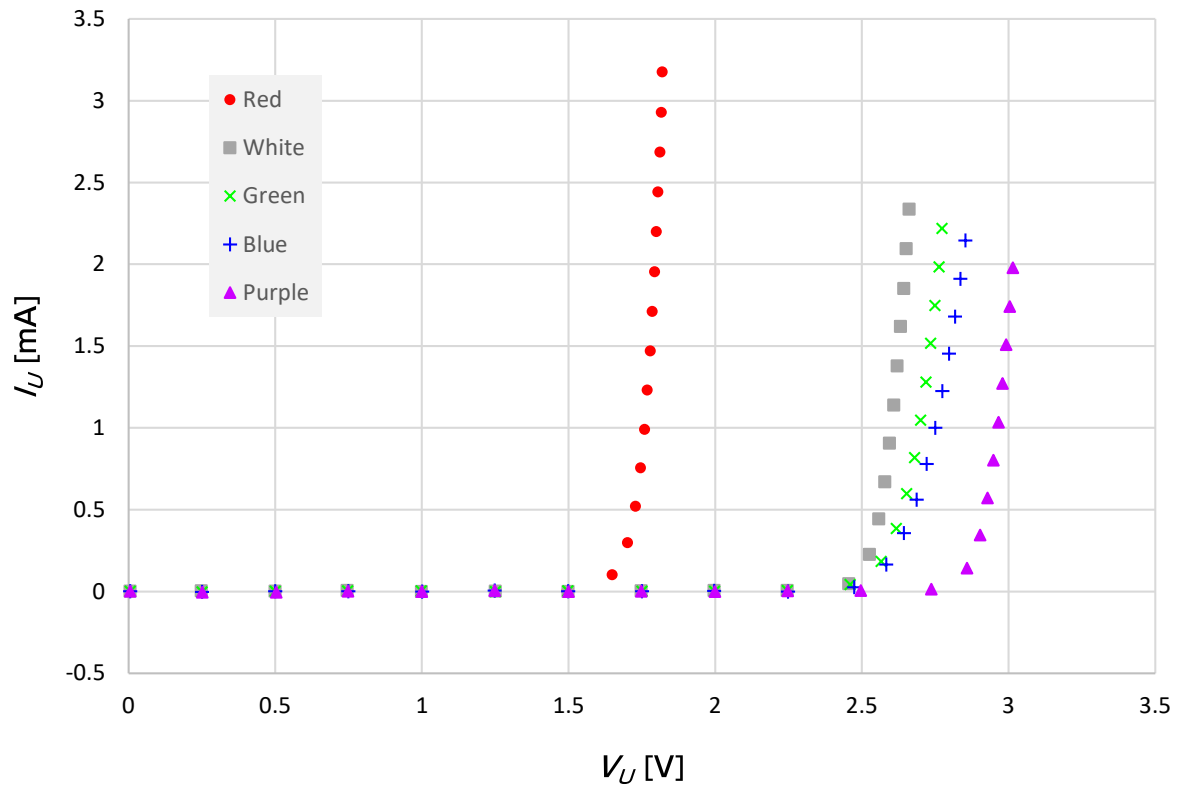


図 14: 発光ダイオード (LED) の電圧電流特性

5 考察

5.1 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共に考察せよ

平均値を求める式には、データの総和とデータの数が含まれる。理想の平均値を得るためには理想のデータの総和が必要である。理想のデータの総和を得るためには、理想のデータが存在する必要がある。理想のデータとは、理想の値との誤差がない(ゼロ)のデータのことである。理想の平均値とは、理想のデータを元に作られた平均値のことである。

標準偏差とは、データのばらつきを示す値で、小さいほどデータのばらつきが少ないということである。よって、理想のデータの標準偏差は 0 である。

5.2 実習 2-2: 出力電圧表示値と計測電圧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

計測結果表 6 を出力電圧-計測電圧グラフにしたものを図 15 に示す。また、計測電圧の近似直線も図 15 に示す。近似直線の傾きは 0.999644855 であり、切片は 0.001997318 である。理想のデータは出力電圧と計測電圧の誤差がゼロなので、理想の近似直線の傾きは 1, 切片は 0 だと考えられる。実際の傾きと理想の傾きはほとんど誤差はなく、正しいデータがとれていることが分かる。

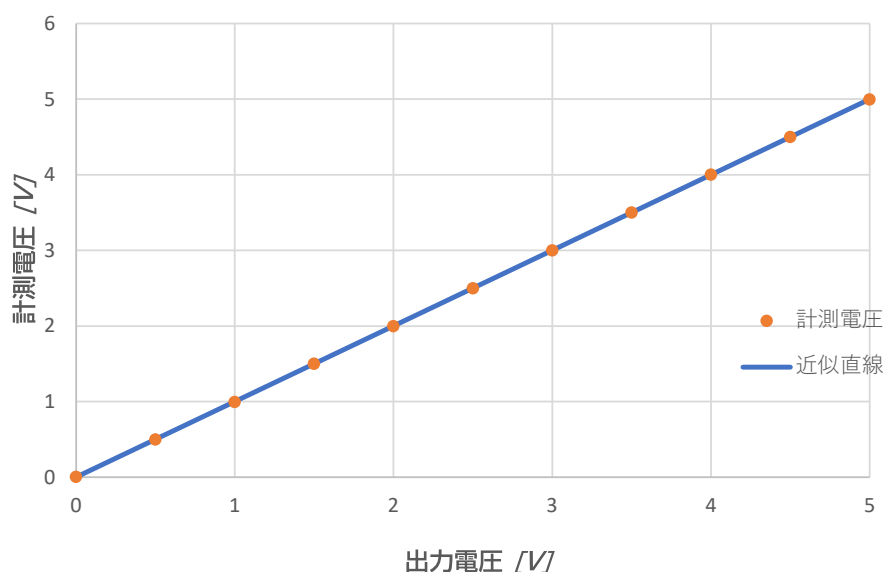


図 15: 計測電圧とその近似直線

5.3 実習 3-1: R_0 の値を変更した時のそれぞれの電圧電流特性の傾きから抵抗値を求め、公称値と比較せよ。また R_0 の変化が算出した抵抗値にどのような影響を及ぼすのかについて考察せよ。

図 8 の傾き、計算された抵抗値と公称値との誤差を表 7 に示す。

傾き a は Excel の LINEST 関数を用いて求めた。 I_U は傾き a を用いて式 (17) で表せる。

$$I_U = a \times V_U \quad (17)$$

オームの法則より抵抗値 R に式 (18) の計算が成り立つ [2]。

$$R = \frac{V_U}{I_U} \quad (18)$$

式 (17) と式 (18) より、抵抗値 R を傾き a の関数で表せる。式変形は下式の通りである。

$$I_U = a \times V_U$$

$$a = \frac{I_U}{V_U}$$

$$a = \frac{1}{\frac{V_U}{I_U}}$$

$$a = \frac{1}{R}$$

$$R = \frac{1}{a}$$

表 7: 計算された抵抗値と公称値との誤差

R_0 [Ω]	公称値 [Ω]	傾き a [Ω^{-1}]	抵抗値 R [Ω]	公称値との誤差 [Ω]
100	1 000	0.000985	1015.485	15.48468
1 000	1 000	0.001003	997.3365	-2.66353
10 000	1 000	0.000988	1012.55	12.54969
100 000	1 000	0.001023	977.6323	-22.3677

R_0 が 1 k Ω の場合の公称値との誤差が最も小さく、1 k Ω との差が大きくなるほど公称値との誤差が大きくなっている。ここから、 R_0 は計測対象素子の抵抗値に近い抵抗値であるほど、算出したデータの精度が良くなると考えられる。また、 R_0 は計測対象素子の抵抗値から遠い抵抗値であるほど、算出したデータの精度が悪くなると考えられる。

今回使用した抵抗器は精度が $\pm 5\%$ のものであった。よって、抵抗器の抵抗値は 950 - 1050 Ω の範囲であると分かる。算出した抵抗値はいずれもこの範囲に収まっている。よって、いずれのデータも正しいデータと言える。

5.4 実習 3-2: 各端子間のつまみ位置による電圧電流特性の変化の仕方から、使用した可変抵抗器の内部構造を推測せよ。

可変抵抗器は図 4 に示されている矢印の範囲のみで可動した。図 11 より、端子 3-1 間は固定抵抗として機能することが分かり、つまみの方向に依存しないことが分かる。表 8 より、端子 3-1 間は 11 k Ω 程度の固定抵抗として機能していることが分かる。

表 8: 端子 3-1 間の抵抗値

-	傾き a [Ω^{-1}]	算出した抵抗値 [Ω]
A 方向	9.29×10^{-5}	10762.63
B 方向	9.30×10^{-5}	10754.04
C 方向	9.29×10^{-5}	10760.11
平均	9.29461×10^{-5}	10758.93

図 9, 図 10 から, 方向と抵抗値 (1/傾き) の関係が逆になっていることから, 線対称な構造になっていると考えられる。よって, 可変抵抗器の内部構造は図 16 のようになっていると考えられる。つまみの平らな面と反対方向に接触部がついており, 赤の範囲の抵抗と接触して導通していると考えられる。

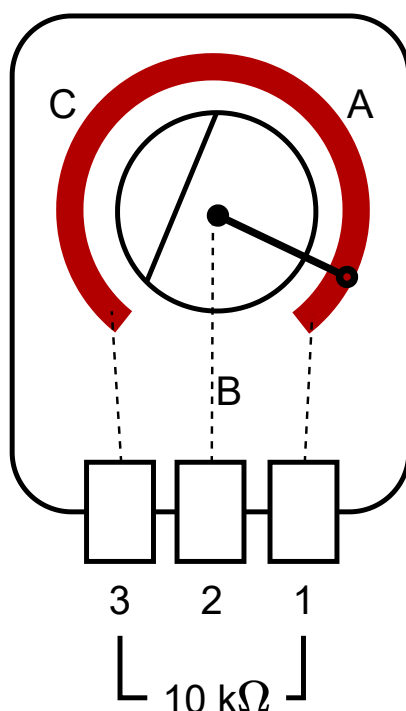


図 16: 可変抵抗の内部構造

5.5 実習 3-3: 電圧電流特性の変化から, CdS センサの抵抗値と光強度の関係について考察せよ。またその (CdS セルの) 原理を調査し, 実験結果が正しいか確認せよ。

図 12 より, 算出した CdS センサの抵抗値を表 9 に示す。一番暗い場合で $583\text{ k}\Omega$, 一番明るい場合で $2.5\text{ k}\Omega$ であった。よって, 明るいほど CdS センサの抵抗値は小さくなり, 暗いほど CdS センサの抵抗値は大きくなると分かる。

表 9: 算出した CdS センサの抵抗値

場合	傾き a [Ω^{-1}]	算出した抵抗値 [Ω]
Dark	1.71612×10^{-6}	582709.6437
Bright	8.76879×10^{-5}	11404.07977
Very bright	3.86895×10^{-4}	2584.681752

日本アイアール株式会社によると,

CdS セルは、カドミウムと硫黄の化合物です。2 種以上の元素からなる半導体を「化合物半導体」といいます。例えば、青色発光ダイオードも化合物半導体を材料としています。

カドミウム (Cd) は毒性のある重金属で最外殻の電子は原子核との結合が弱く、自由電子となり導電性です。これに硫黄 (S) を結合させるとカドミウムの自由電子を硫黄原子が捕捉して絶縁体に変化します。この自由電子の捕捉力は非常に弱く、光があたると自由電子を放出して導体に変化します。

したがって、光の量によって放出する自由電子の量が増加し、抵抗値が増加することになります。これを「光電効果」といい、正確には「内部光電効果」と呼びます。

という原理より「CdS セルの受光部に当たる光の量が多ければ、抵抗値が小さくなる。」という [8]。この抵抗値と光強度の関係は実験結果と対応していたため、実験結果は正しいといえる。

5.6 実習 3-4: 電圧電流特性の変化から、力の強さに依存して力センサの抵抗値がどのように変化するか考察せよ。またその（感圧センサの）原理を調査し、実験結果が正しいか確認せよ。

図 13 より、算出した力センサの抵抗値を表 10 に示す。力を加えない場合で 840 k Ω 、感圧部を強くつまんだ場合で 4.4 k Ω あった。よって、力を加えるほど抵抗値が減少し、力が加えられないほど抵抗値が増加すると分かる。

表 10: 算出した力センサの抵抗値

場合	傾き a [Ω^{-1}]	算出した抵抗値 [Ω]
Apply no force	1.19045×10^{-6}	840019.0231
Apply force	2.26175×10^{-4}	4421.35842

NISSHA によると抵抗膜式圧力センサは

導電性感圧インク層と下部電極をスペーサーを挟んで対面させた構成の圧力センサーです。感圧インクは押圧によって変形する柔軟な樹脂材料の中に導電粒子を配合したものが使われます。感圧インク層の表面には導電粒子が微細な凹凸をなして露出しています。感圧インク層が押し縮められると、下部電極と感圧インク層表面の導電粒子との接触面積が大きくなり、抵抗値が変化します。この抵抗値の変化を検出して圧力を測定します。

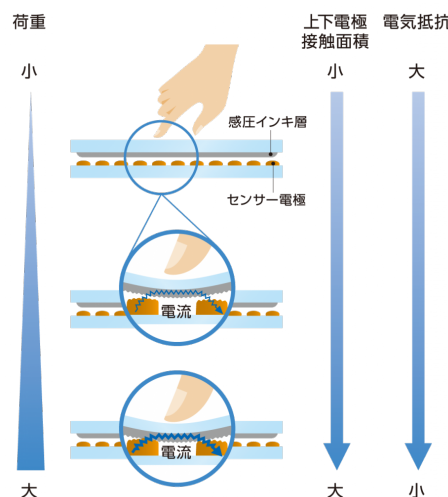


図 17: 抵抗膜式圧力センサの構造

出展:NISSHA 株式会社 (2022/07/27)

という原理より、圧力が大きくなると抵抗値が減少するという [9]。この抵抗値と圧力の関係は実験結果と対応していたため、実験結果は正しいといえる。

5.7 実習 3-5: 発光の色が異なるということは物理量として何が異なっているのかを示し、LED の色に応じて電圧電流特性の特徴（立ち上がり電圧，傾き）にどのような違いがあるか考察せよ。

光は電磁波の一種であり、可視光は波長が 380 nm から 780 nm の電磁波のことである。電磁波の波長と名称を示した図を図 18 に示す [10]。

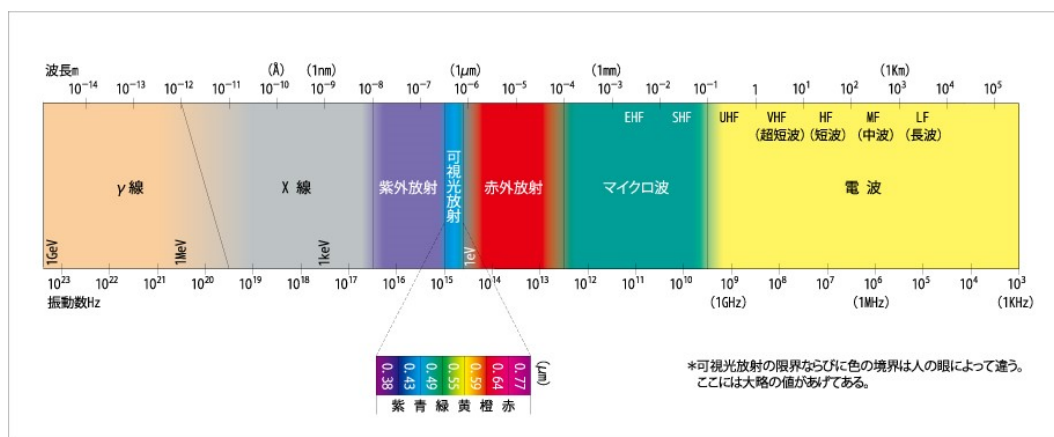


図 18: 電磁波の波長と名称

出展: ウシオ電機株式会社 (2022/07/27)

光を粒子として扱うと、光子のエネルギー E [J] はプランク定数 h [J·s] と振動数 ν [Hz] より式 (19) で表せる。

$$E = h\nu \quad (19)$$

振動数 ν [Hz] は、光速 c [m/s] と波長 λ [m] より下式で表せる [4]。

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (20)$$

これを式 (19) に代入する。

$$E = h\frac{c}{\lambda} \quad (21)$$

この式のうち、プランク定数 h と光速 c は定数である。よって、波長 λ のみが光子のエネルギー E の変数だとわかる。また、 λ が小さいほど E は大きくなり、 λ が大きいほど E は小さくなるとわかる。

図 18 より、可視光のうちでは赤が最も波長が長く、紫が最も波長が短いと確認できる。よって、赤が最もエネルギーが小さく、紫が最もエネルギーが大きいと分かる。

Panasonic によると、LED の発光原理は

LED チップに順方向の電圧をかけると、LED チップの中を電子と正孔が移動し電流が流れます。移動の途中で電子と正孔がぶつくと結合（この現象を再結合という）し、再結合された状態では、電子と正孔がもともと持っていたエネルギーよりも、小さなエネルギーになります。その時に生じた余分なエネルギーが光のエネルギーに変換され発光します。これが LED の発光原理です。

だという。LED を構成する N 型・P 型半導体に使われる物質の違いが「余分なエネルギー」を決定していると考えられる。「余分なエネルギー」が小さいと赤、大きいと紫になると考えられる。LED の発光波長 λ [nm] は化合物半導体材料のエネルギーバンドギャップ E_g [eV] を用いて下式で表せる [12]。

$$\lambda = 1240/E_g \quad (22)$$

この式より E_g が小さいほど波長が長くなり赤に近づき、 E_g が大きいほど波長が短くなり紫に近づくと分かる。「余分なエネルギー」を式に表すと下式のようになる。

$$(\text{余分なエネルギー}) = (\text{外部から与えたエネルギー}) - (\text{再結合で消費されたエネルギー}) \quad (23)$$

再結合で消費されたエネルギーが一定だと仮定する。すると、外部から与えたエネルギーは、赤色 LED より紫色 LED のほうが発光するのに必要なエネルギーが大きいと考えられる。また図 14 より、赤がより低い電圧から電流を流し(発光し)、紫がより高い電圧から電流を流す(発光する)ことが確認できる。

よって、波長が長い光は立ち上がり電圧が低く傾きが急になり、波長が短い光は立ち上がり電圧が高く傾きが緩やかになると考えられる。

5.8 独自: ラインセンサに Cds センサが使われないのはなぜか

ロボットのラインセンサの受光素子は一般的にフォトトランジスタ、フォトダイオードが使用される。Cds センサも受光素子であるが、ラインセンサとしては使われていない。

日本アイアール株式会社によると、Cds センサは「光量変化に対する抵抗変化は大きいですが、変化追従は遅くなっています。光量を抵抗値に変換する素子として、ゆっくりした変化の検出に利用されます。」という特性があるという [8]。高速で移動するロボットのラインセンサの受光素子に Cds センサが使われないのは、この特性が影響していると考えられる。しかし、低速であれば Cds センサでも十分に機能すると考えられる。ラインセンサに Cds センサを採用した場合、Cds センサがフィルターとなりノイズへの耐性が高くなると考えられる。

6 結論

この実験を通して、以下の3つを達成できた。

- LabVIEW と 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。

参考文献

- [1] 小島寛之, 完全独習 統計学入門, ダイアモンド社, 東京, 2008
- [2] 阿部武雄/村上 実, 電気・電子計測, 森北出版株式会社, 東京, 2019
- [3] 堀田栄喜, 電気基礎 1 新訂版, 実教出版株式会社, 東京, 2020
- [4] 小暮陽三, 高専の物理 [第5版], 森北出版株式会社, 東京, 2020
- [5] -, “調和平均とは”, 東京理科大学理工学部 数学科, <https://www.ma.noda.tus.ac.jp/u/tg/html/mean.html>, 2022/07/19
- [6] -, “最小二乗法の意味と計算方法 - 回帰直線の求め方”, sci-pursuit.com, <https://sci-pursuit.com/math/statistics/least-square-method.html>, 2022/07/20
- [7] -, “【評価指標】二乗平均平方根誤差 (RMSE) とは”, AI Academy Media, <https://aiacademy.jp/media/?p=2500>, 2022/07/20
- [8] -, “3分でわかる技術の超キホン CdS セルとは? 原理と電子回路での使い方を解説!”, 日本アイアール株式会社, <https://engineer-education.com/cds-cell/>, 2022/07/26
- [9] -, “フィルム型圧力センサーの利点と用途を知る”, NISSHA 株式会社, https://connect.nissha.com/filmdevice/filmdevice_column/advantages_film_pressure-sensor, 2022/07/27
- [10] -, “電磁波と光”, ウシオ電機株式会社, https://www.ushio.co.jp/jp/technology/glossary/material/attached_material_01.html, 2022/07/27
- [11] -, “LED の発光原理”, Panasonic, <https://www2.panasonic.biz/jp/lighting/led/basics/principle.html>, 2022/07/27
- [12] -, “ディスクリート半導体の基礎”, TOSHIBA, <https://toshiba.semicon-storage.com/content/dam/toshiba-ss-v3/apc/ja/semiconductor/knowledge/e-learning/discrete/discrete-basic-chap5.pdf>, 2022/07/27