

0. はじめに

本ドキュメントは、[スイッチング基板_回路図 v1.1.0_20210707.pdf]の回路についての設計解説書です。

この回路は非産業用ロボットプロジェクトで開発中のレスキューロボット内に搭載することを“想定”し、既存の回路を再設計したものです。この回路はまだ作成・組込まれていないことに留意してください。

本ドキュメントでは、スイッチング基板について以下の項目を取り上げます。

- ・ 基板の役割
- ・ 回路設計
- ・ 製造上の注意
- ・ 設計者の考える追加改良案

電氣的知識があまりない人にも可能な限り分かりやすく説明しているつもりです。

本ドキュメントの内容に関して不明点等あれば以下までご連絡ください。

送信先：田中邦明 アドレス：tkknka1114@gmail.com

目次

1. 基板の役割	2
1.1. ロボット全体における基板類の概略	2
1.2. スwitching基板の役割	3
2. 回路設計	5
2.1. 電源出力	6
2.1.1. n-MOSFET	7
2.1.2. ゲート抵抗	8
2.1.3. ゲートソース間抵抗	12
2.1.4. ヒューズ	15
2.2. 電源入力	15
2.2.1. 3端子レギュレータ	16
2.2.2. LED	17
2.3 電圧監視回路	17

1. 基板の役割

1.1. ロボット全体における基板類の概略

まず基板の説明をする前に、図1にロボット全体の基板類の概略図を示します。

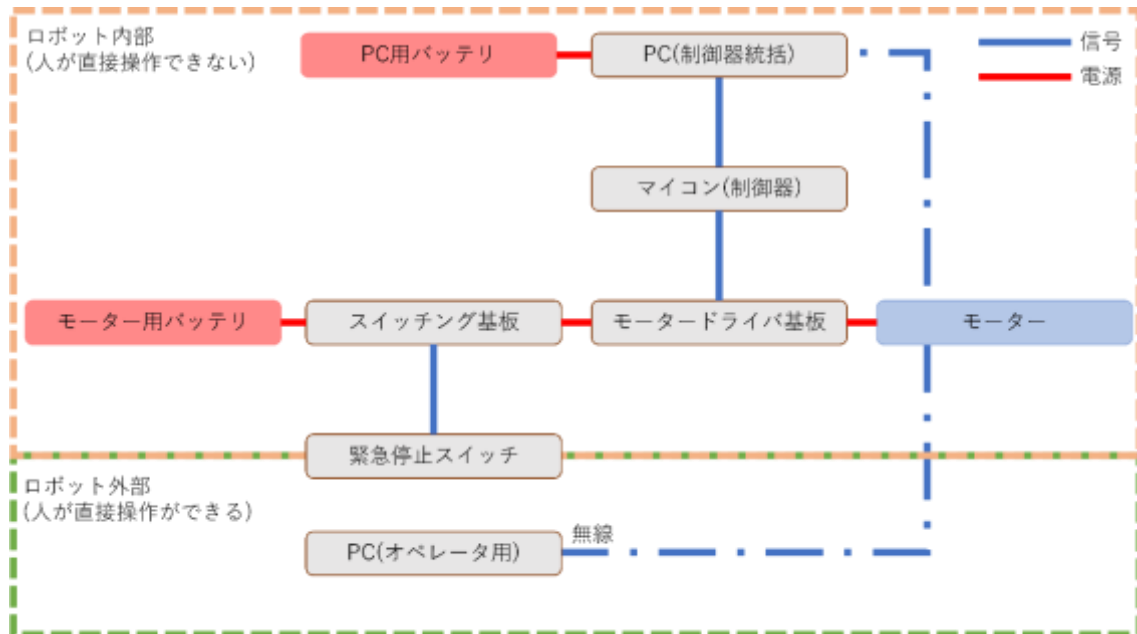


図1 ロボットシステム概略図

この中でスイッチング基板が接続しているのは

- ・モーター用バッテリー
- ・緊急停止スイッチ
- ・モータードライバ基板（モーターを制御する基板）

の3つです。緊急停止スイッチが操作されたとき、バッテリーからモータードライバ基板への電力供給が遮断され、ロボットが停止するようになっています。

1.2. スwitchング基板の役割

レスキューロボットに採用している緊急停止スイッチは図 2 のように、通常時は導通しており、緊急時にはスイッチを押し込むことで切断する仕組みになっています。

(大半の緊急停止スイッチは押し込んで切断する NC タイプですが、稀にそうでないものも)

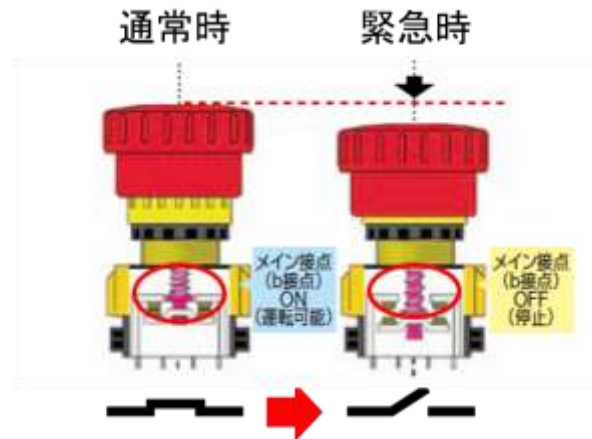


図 2 緊急停止スイッチ内部構造

ならば、バッテリーを直接緊急停止スイッチにつなげて同じことになるのでは？と考える人もいます。しかし、図 3 のようにつなげるのは場合によっては危険です。

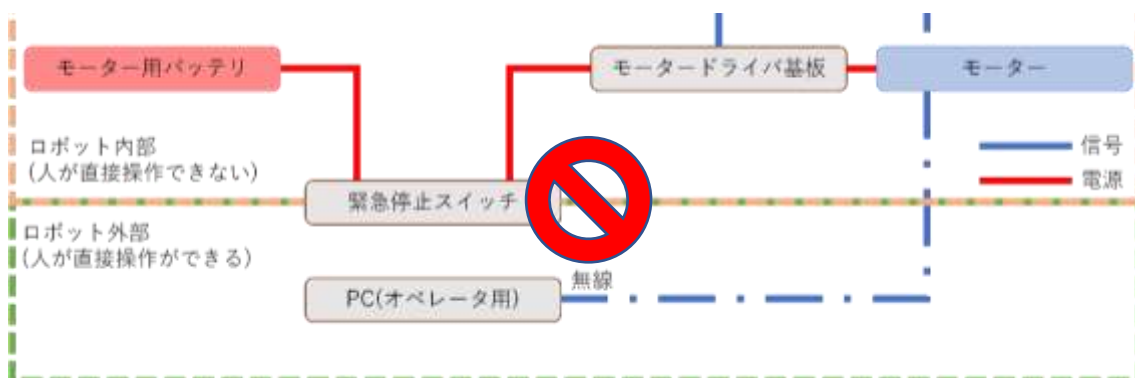


図 3 バッテリー接続のダメな例

なぜダメなのでしょう？それは、スイッチにも流せる電流の上限があるからです。

機械的な構造を持つスイッチは、接点部に抵抗があります。そのため電気が流れる際に接点部で発熱します。大電流が流れると異常発熱し、接点同士が溶けてくっついてしまう、つまり常に ON 状態に陥ります。そうなってしまえばスイッチの意味がありません。

モーターは、動かすのに非常に大きな電流（数 A 以上）が必要です。そのためバッテリーとモーターの間に機械的スイッチをつなげてしまうと、スイッチを壊してしまう可能性が非常に高いです。

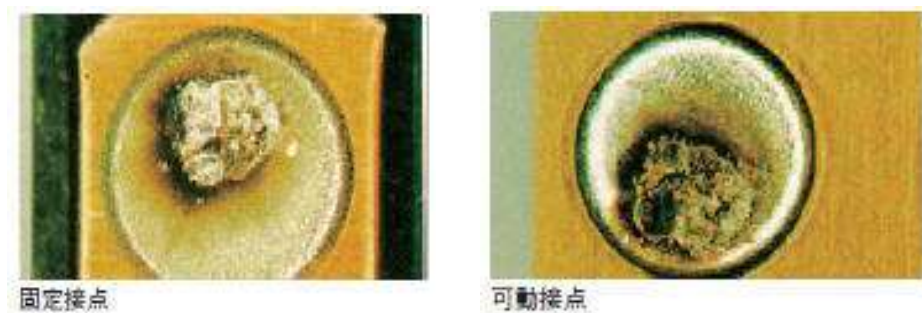


図4 スイッチ接点の溶解の様子

そこで大電流が流れる回路でもスイッチングを行うために、“電氣的”スイッチを利用します。その名の通り、電気で電気のスイッチ操作するわけです。このような機能を持つ素子のことをトランジスタといいます。

トランジスタは機械的な構造を持たないので接点がなく、大電流のスイッチングを小電力で行うことができます。

（ここではトランジスタの原理については説明しません。

インターネット上に様々な解説資料がありますので、参考にしてください。）

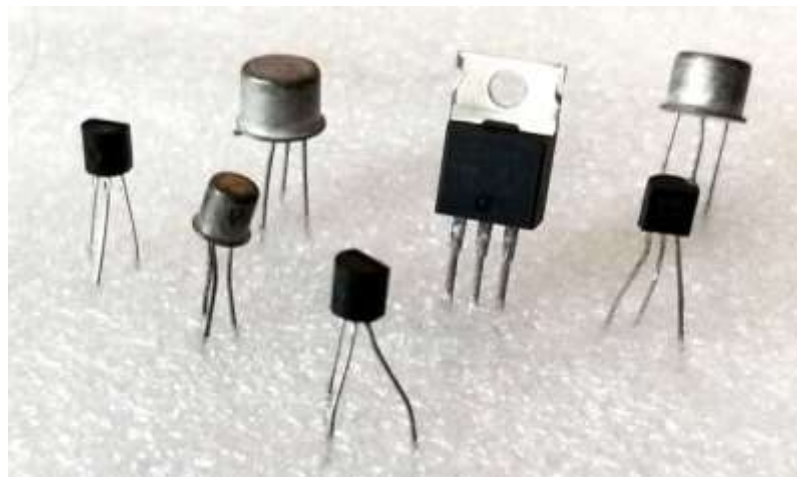


図5 トランジスタ

スイッチング基板はつまり、機械的スイッチで電氣的スイッチの操作を行い、電氣的スイッチがバッテリーからの大電流を制御する基板です。こうすることで初めて、人が操作しやすい機械的スイッチを使って大電流を制御できるようになるわけです。

2. 回路設計

ここからは、設計者が作成した回路と合わせて詳細に説明していきます。

この回路は大きく分けて3つの領域に分かれています。

[スイッチング基板_回路図 v1.1.0_20210707.pdf]を開き、適宜拡大等して確認してください。

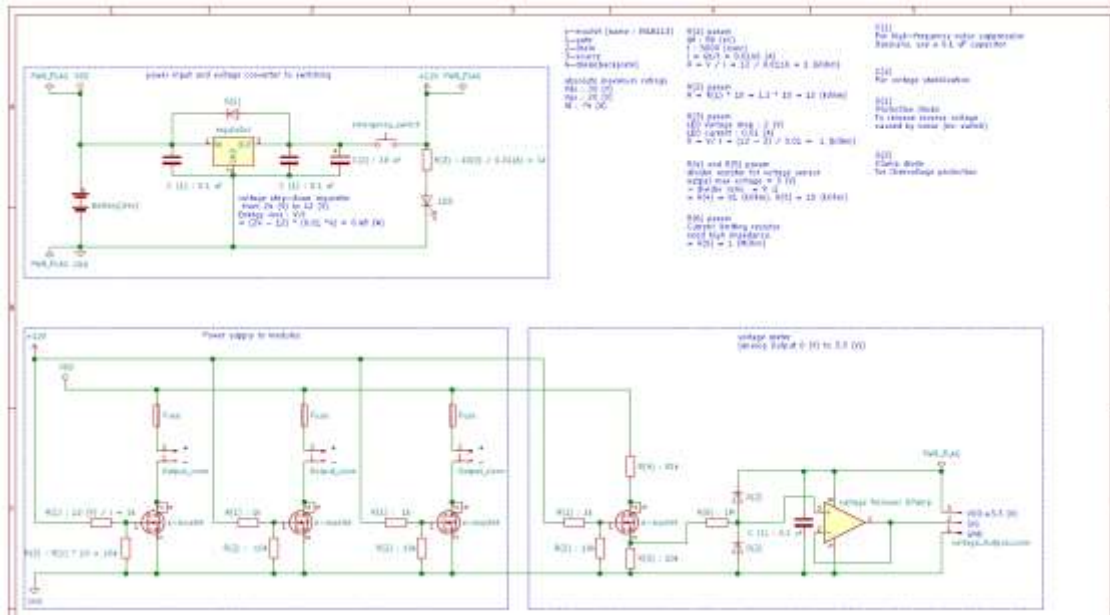


図 6 回路図全体

2.1. 電源出力

まずはこの基板における最重要区画，電源出力部を見てみます。

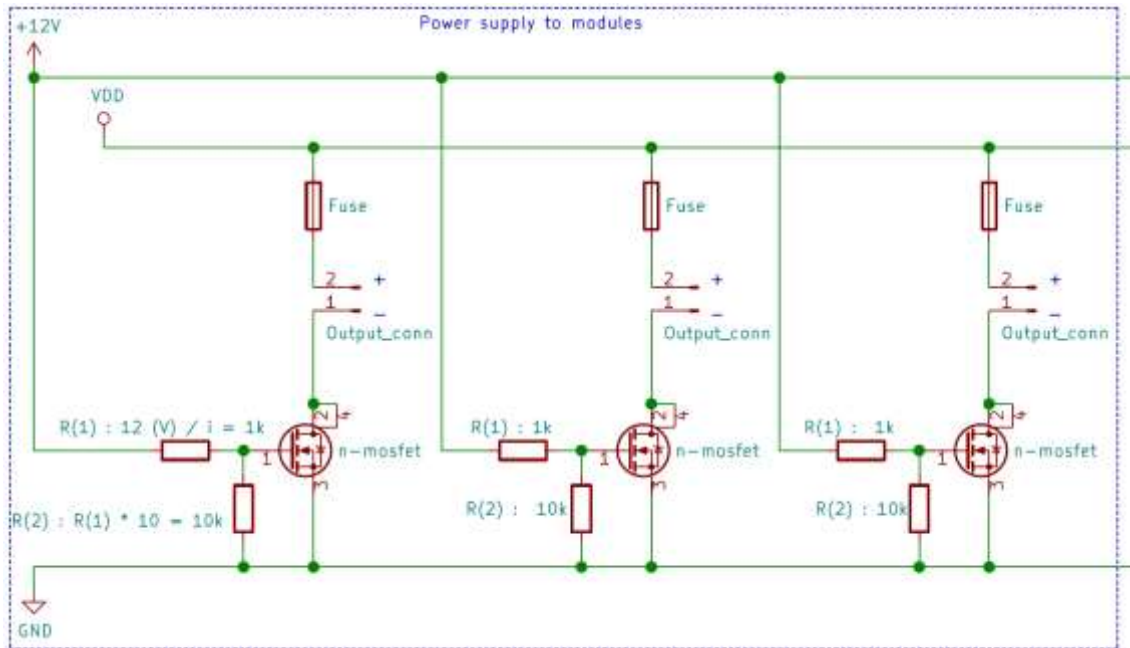


図7 電源出力部

この回路では，電源出力コネクタ(Output_conn)を3つ用意しています．このコネクタからモータードライバへ電力を供給します(図8)．

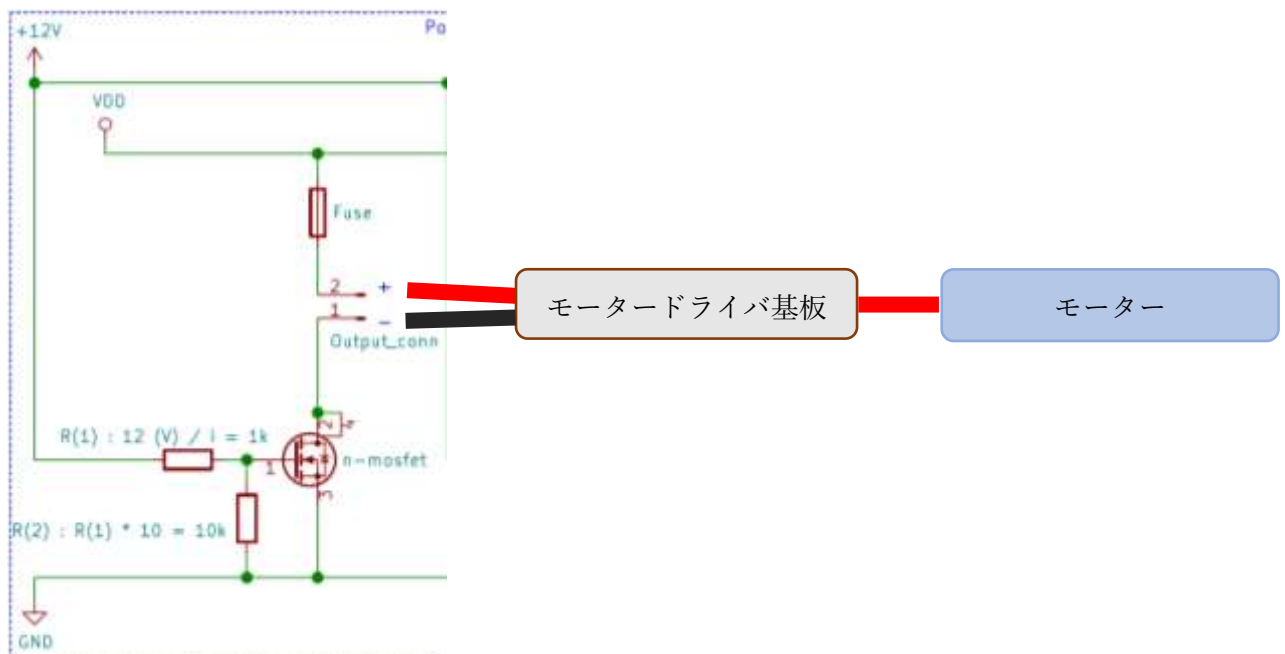


図8 電源出力部(1 unit)

2.1.1 n-MOSFET

この基板における最重要素子でトランジスタの一種です。この素子によって電源のスイッチング操作を行います。



図9 MOSFET

MOSFET には 2 種類 (P channel, N channel) あります。どちらもスイッチング可能な素子ですが、若干使い方が異なります。普通に使う分には N channel の方が使いやすいと思いますので、ここでは N channel の MOSFET のみ解説します。

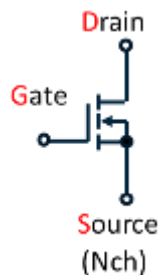


図10 n-MOSFET 回路記号

n-MOSFET は、図9からわかる通り3つの端子が出ています。これらはそれぞれ、Drain, Gate, Source の端子となっています。モーター用バッテリーの電流は Drain から Source にかけて流れ、その流れを Gate-Source 間電圧によって制御します。

⇒ Gate-Source 間電圧が 0 V であれば Drain-Source 間は遮断
Gate-Source 間電圧が閾値以上であれば、Drain-Source 間が導通

MOSFET を選定する際には、耐圧、耐電流、Gate-Source 間の閾値電圧に注意してください。この回路で使用を想定した IRL8113 であれば、Drain-Source 間の最大耐電圧は 30V、耐電流は 74 A、Gate-Source 間の耐電圧は 20 V、閾値電圧は 1.35 ~ 2.25 V です。

参考サイト : https://ana-dig.com/transistor_fet/

2.1.2 ゲート抵抗

参考サイト : https://ana-dig.com/fet_gate1/

参考資料 : [TOSHIBA MOSFET 設計](#)

n-MOSFET を使用するためには、Gate-Source 間に電圧をかける必要があることを前項で説明しました。ここで回路全体を見ると、n-MOSFET には2つの抵抗が接続されていることがわかります。この項では、下図に示されている、スイッチからの12 V と Gate 間に接続されている抵抗（ゲート抵抗）について解説します。

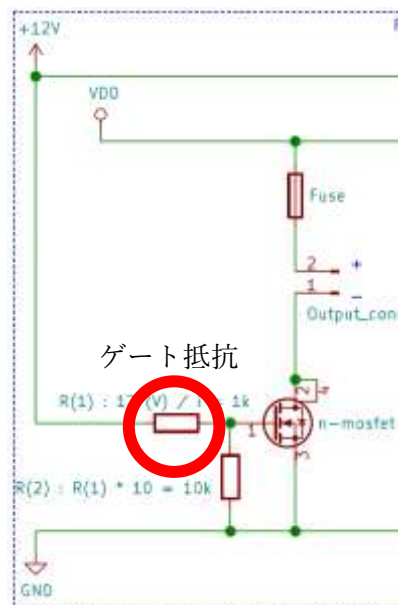


図 11 ゲート抵抗の位置

n-MOSFET の Gate-Source 間はコンデンサのような働きを持ち、このコンデンサが閾値電圧($V_{GS(Th)}$)以上になった時、Drain-Source 間が導通すると理解してください。下図は n-MOSFET を他の素子で簡略的に示したものです。

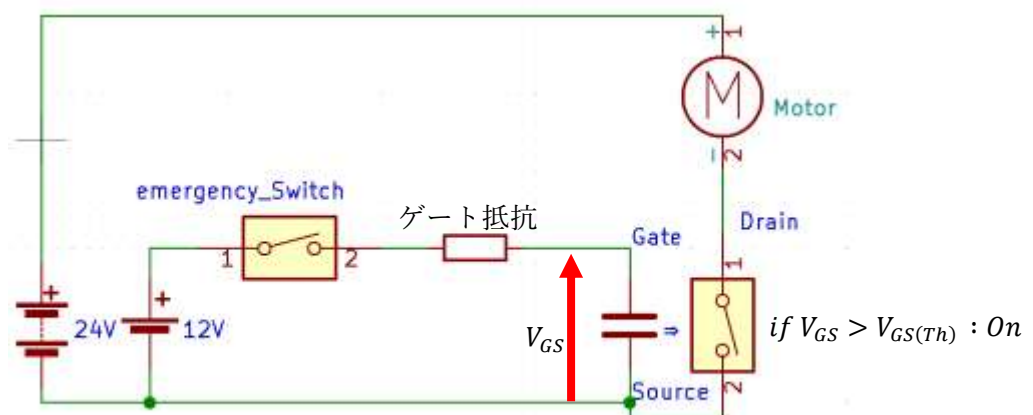


図 12 n-MOSFET の概略

ここでコンデンサの働きについて確認しましょう。

直流電源におけるコンデンサは、充電が空っぽの時、抵抗値は 0（短絡）として考え、満充電の時の抵抗値は無限大（解放）と考えます。

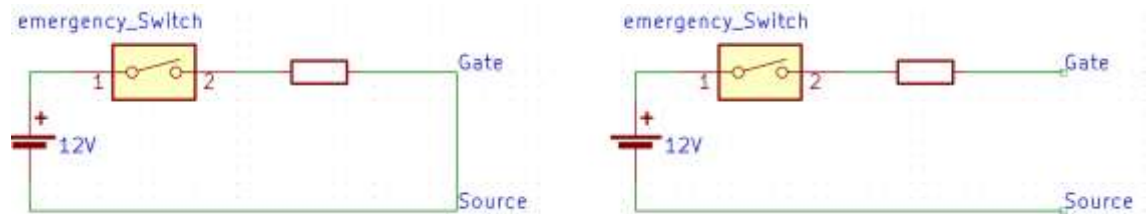


図 13 コンデンサの充電状態による回路表現

左：コンデンサが空 右：コンデンサ満充電

仮にゲート抵抗がない場合、コンデンサが空ならば、バッテリーがショートしていると考えることができます。この状態は無制限に電流を流せるということであり、バッテリーが異常発熱したり回路を焼損させたりする要因になり非常に危険です。スイッチング用の電源回路(ドライブ回路)の保護のためにゲート抵抗が必要というわけです。

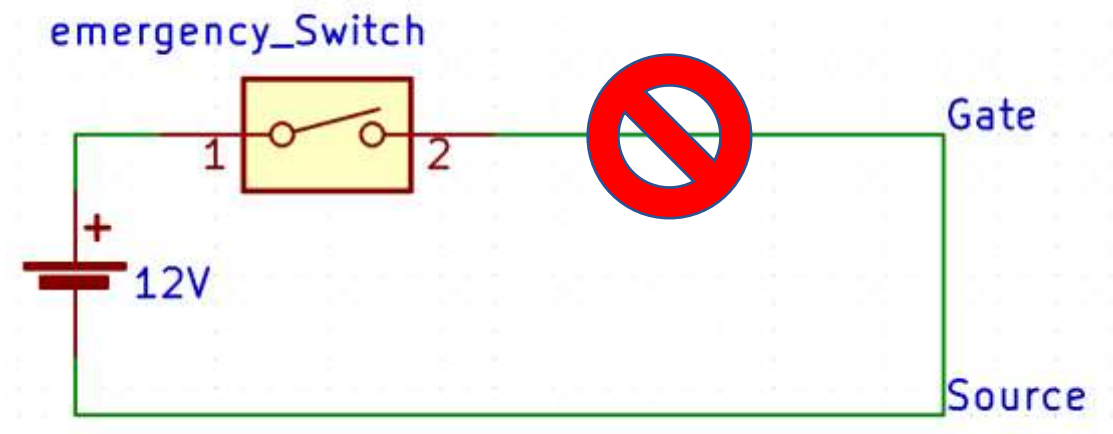


図 14 バッテリーがショートしている危険な状態

このようなつなぎ方をしては絶対にダメです

では次に、どの値の抵抗を使えばよいのかについて説明します。

先ほど n-MOSFET の Gate-Source 間はコンデンサのような役割を持つことを説明しました。コンデンサの充電速度は流れ込む電流量によって変化します。コンデンサの充電が早ければそれだけ早く Drain-Source 間は導通します。

コンデンサの充電時間を計算するためには、Gate の電荷量 Q_g を見ます。

n-MOSFET のデータシートより、 $Q_g - V_{GS}$ グラフを確認します。今回は IRL8113 のパラメータを確認します。

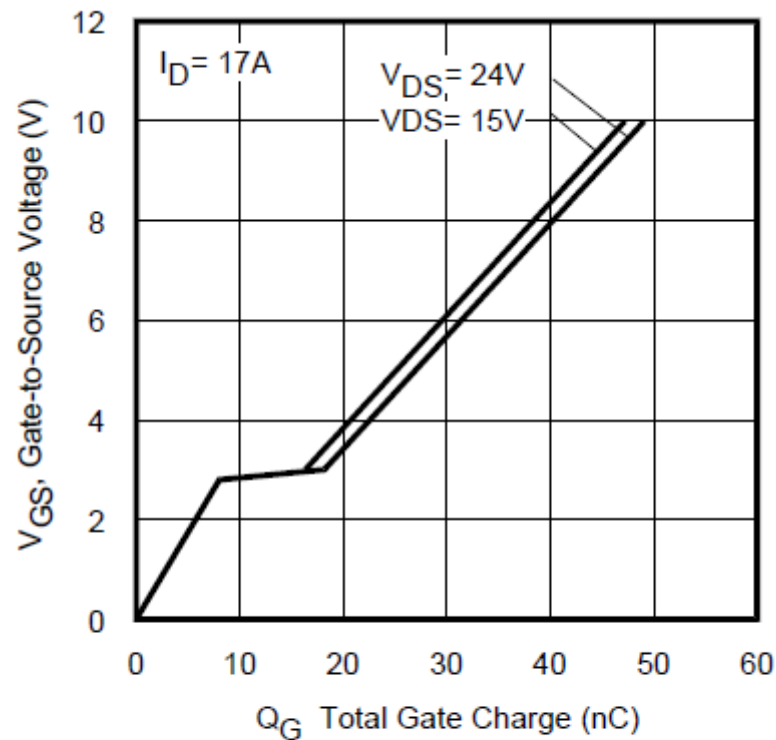


Fig 6. Typical Gate Charge vs. Gate-to-Source Voltage

図 15 n-MOSFET の $Q_G - V_{GS}$ グラフ

今回の回路では、 V_{GS} に 12 V を印加します。図 15 より、 V_{GS} が 12 V 付近の Q_G を見ると、およそ 58 nC と読み取れます。

(グラフが途中で切れているように見えますが、一般的に MOSFET は V_{GS} が 10 V で駆動することが基本のようで、このデータシートではそこまでしか記入されていないようです。今回の場合は直線を延長して考えて問題ありません)

Q はある電流 I をある時間 t だけ流した時の電荷量であり、(1) 式で表されます。

$$Q = I * t \quad (I: \text{電流量}, t: \text{時間}) \quad (1)$$

ここからわかるように、 Q_G が与えられている今、充電時間あるいは流す電流量を決定すればもう一方の変数が一意に定まります。今回は時間を 5000 nsec と定めてみましょう。すると計算結果は(1)式より

$$I_G = \frac{Q_G}{t} = \frac{58 * 10^{-9}}{5000 * 10^{-9}} = 0.0116 (= 11.6 \text{ mA}) \quad (2)$$

よって、(2)式より Gate に流れ込む電流量が 11.6 mA とわかりました。

今回は時間 t を 5000 nsec と決めましたが、この値は今までの制作経験則からであり、また最終的に計算結果の電流量が約 10 mA 程度になる範囲として定めたので、かなり適当です。精度が必要な回路であれば厳密に決定すべきですが、今回は接続される機器にそこまで電氣的な精度が求められていないので、ある程度適当で問題ありません。逆に電流量を定め、それにかかる時間を計算しても構いません。

(10 mA を流すと定めるなら、充電時間が 5800 nsec となります)

詳細な設計を行いたい場合は TOSHIBA の参考資料をご覧ください。

必要な電流量が求まったら、あとは単純なオームの法則で解くことができます。

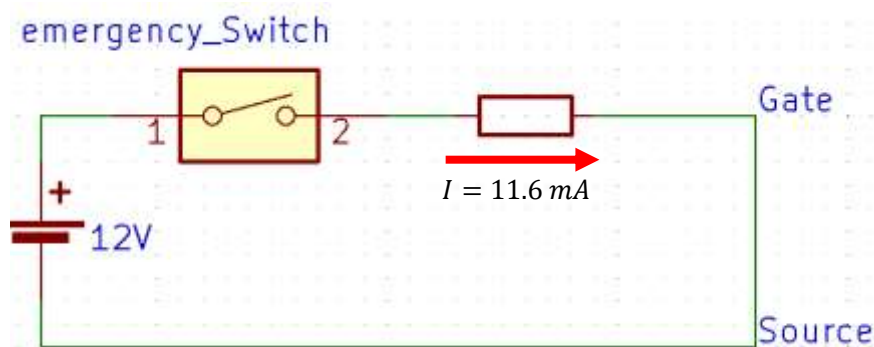


図 16 抵抗値計算

図 16 を見れば単純ですね。オームの法則(3)式より

$$R = \frac{V}{I} = \frac{12}{11.6 \times 10^{-3}} = 1034.4 \approx 1 \text{ k}\Omega \quad (3)$$

この計算結果から、実際に販売されている抵抗を選択し、1 k Ω をゲート抵抗として使用することが決定しました。

2.1.3 ゲートソース間抵抗

参考サイト : https://ana-dig.com/fet_gate2/

<https://detail-infomation.com/mosfet-gate-to-source-resistor/>

つぎに Gate-Source 間に並列して接続されているゲートソース間抵抗を考えます。

前項では、ゲートソース間抵抗はないものとして取り扱っていました。それはこの抵抗が持つ役割がゲート抵抗とは全く異なり、またゲート抵抗に対して非常に高い抵抗値のため電流路への影響が非常に小さいためです。

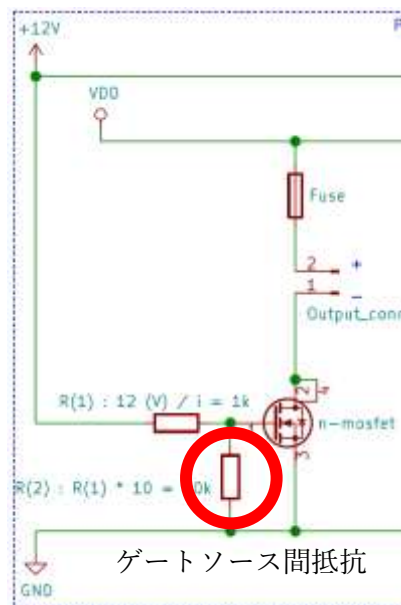


図 17 ゲートソース間抵抗の位置

ゲートソース間抵抗の役割は、回路の安定性を高めるためです。
簡単な思考テストをしてみましょう。

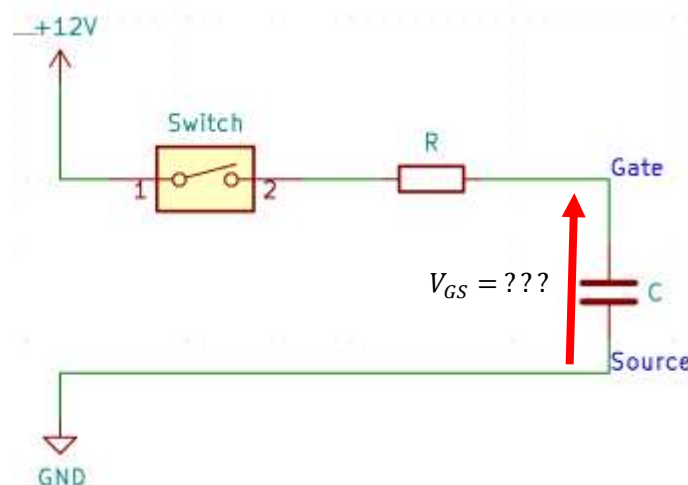


図 18 n-MOSFET 等価回路

図 12 の回路上のスイッチがオフ、つまり回路がつながっていない場合を考えます。スイッチがオフだからといって、Gate の電圧が 0V となることが決まるわけではありません。そもそも電圧の基準となる 0V というのは GND 線の電位のことであり、高電位をもつ電圧源から GND につながる回路があって初めて電圧が決まります。スイッチがオフであるため、回路として不成立であり、そもそも電圧を規定できません。このような状態を電気回路の世界では配線が「浮いている」と表現する様です。

また、Gate-Source 間をコンデンサで表現したように、Drain-Source 間のスイッチをオフにするためにはコンデンサ内の電荷を逃がしてやる必要があります。しかし図 12 の回路ではコンデンサにたまった電荷を逃がす経路が存在しません。

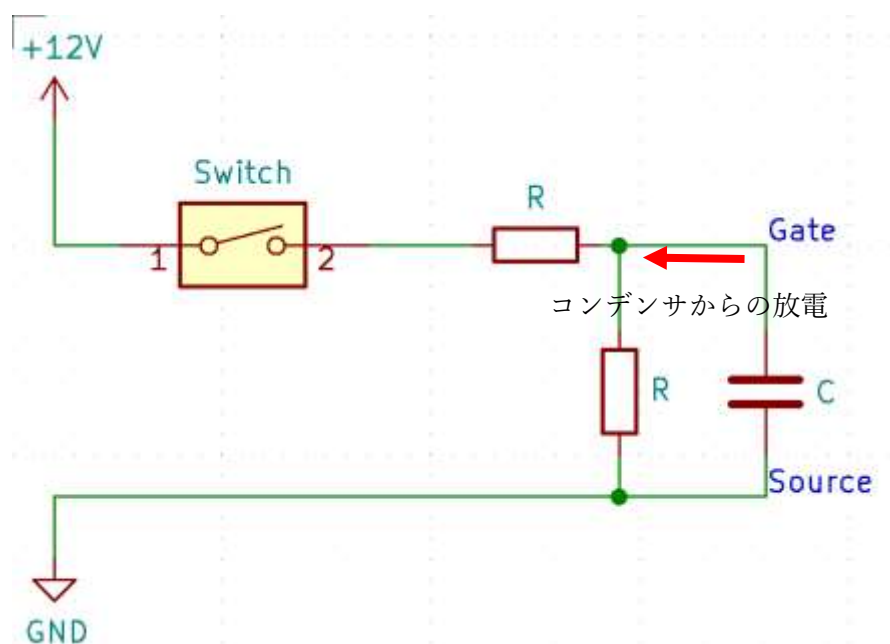


図 19 ゲートソース間抵抗つき回路

図 19 のように、ゲートソース間と並列に抵抗をつなげることで、スイッチがオフになったとしても、ゲートソース間のコンデンサには GND とつながる経路が出来上がり、コンデンサの電荷を逃がすことができ、Gate への電位を 0V に保つことができるようになります。この抵抗があることで、n-MOSFET を確実に電源オンオフできるようになります。

では次に、どの値の抵抗を使えばよいのかについて説明します。

初めに説明したように、この抵抗は電流を流すことを目的とはしていません。そのため電流はあまり流さず、電圧は小さくなるようにゲート抵抗に対して十分に大きい抵抗値に設計します。

大きすぎると今度はコンデンサからの電荷の放出に影響を与えるため、ある程度の大きさにとどめる必要があります。

まず、ゲート電圧 V_{GS} の電圧とドレイン電流 I_D のグラフを見て、 V_{GS} に印加する電圧の下限を検討します。

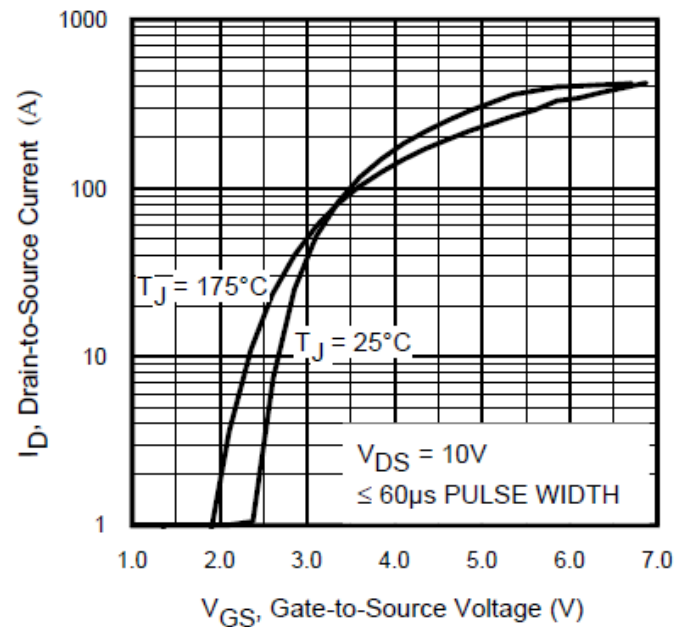


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

図 20 $V_{GS} - I_D$ グラフ

図 20 より、 V_{GS} が 7V 以上ならば、 I_D が飽和することがわかります。ですので、 V_{GS} の最低電圧を 7 V とし、抵抗値を決定してみましょう。 V_{GS} の電圧源は 12 V なので、ゲート抵抗 R_G とゲートソース間抵抗 R_{GS} の比は、分圧の関係から

$$R_G : R_{GS} = 5 : 7 \quad (4)$$

と定まります。今回 R_G は前項より 1 k Ω と定めたので、 R_{GS} は最低 1.4 k Ω にすればよいです。しかし、この抵抗値は最低限ですので、これよりも大きい抵抗値を設定しておけば、 V_{GS} が 7 V を下回ることはありません。

参考サイトではつぎに、 V_{GS} の電圧源が流せる電流量について検討していますが、今回の場合は、ここで用いる電流量の限界はひとまず無視できるものとして考えます。もしスイッチング用電圧源をマイコン等から供給する場合はここも十分に検討しましょう。

次に、ドレインに急激に電圧が加わった時に流れてしまうノイズ電流の影響を検討します。しかし、ノイズ電流が実際どれくらい流れるかは不明です。そのため、ある程度の抵抗値を設定しておき、エラーが発生した際に調整するのが現実的と思われます。

以上より、(4)より R_{GS} には**最低** $1.4\text{ k}\Omega$ の抵抗を用いればよいことがわかります。今回はゲート抵抗 R_G の10倍の値として $10\text{ k}\Omega$ と決めました。この抵抗値であれば V_{GS} が閾値を超えるために必要なノイズ電流は 0.15 mA となります。

バッテリー電源を印加したとき、一瞬モータドライバに電源が入る場合はノイズ電流で V_{GS} が閾値を超えてしまっていることになるので、 R_{GS} の抵抗値をより小さくする必要があります。

2.1.4 ヒューズ

参考サイト：<https://www.socfuse.com/ja/technical-info-data/3509/>

この回路には各 MOSFET にヒューズを搭載しています。このヒューズの目的は、モータドライバへの出力段以降で発生したショートなどに対する対策として取り付けています。バッテリー保護用ではないことに注意してください。

ヒューズの選定は、本来であれば非常に厳密な測定に基づいて決定されるべきものです。(参考サイトをご覧ください)

ですが現時点でヒューズの選定に必要な情報はほぼ得られていません。各モータドライバ以降で消費する電流、電圧の時系列データが必要です。今後それらの計測が必要です。現時点ではお守り程度に思っておいてください。

2.2. 電源入力

電源入力を受ける部分は以下の回路図になっています。

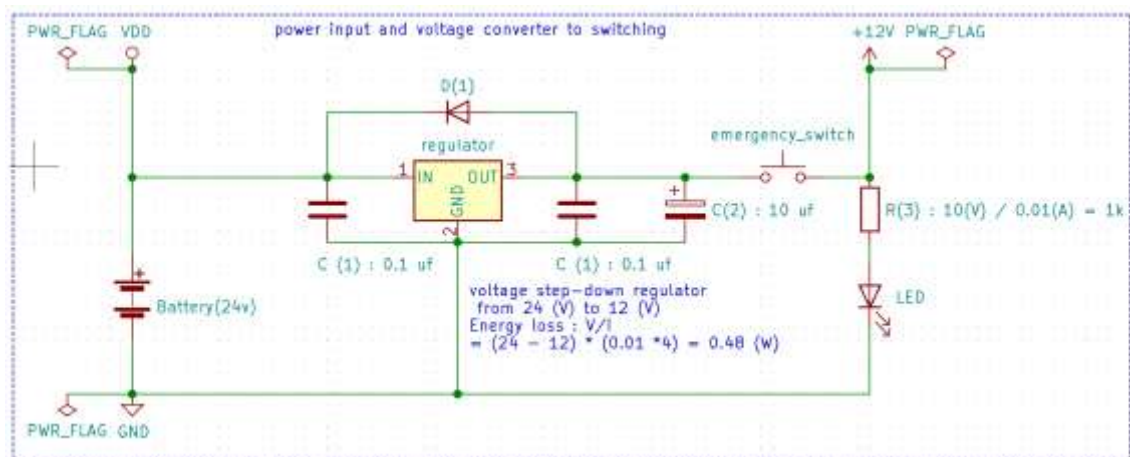


図 21 電源入力段

(回路上の PWR_FLAG は回路には無関係です)

画面左側にある Battery がモーター用に用意している Li-Po バッテリーです。ここから VDD につながり、前項で説明した MOSFET の Drain へ流れ込みます。

ここではバッテリーから右側へつながっている回路について解説します。

2.2.1. 3 端子レギュレータ

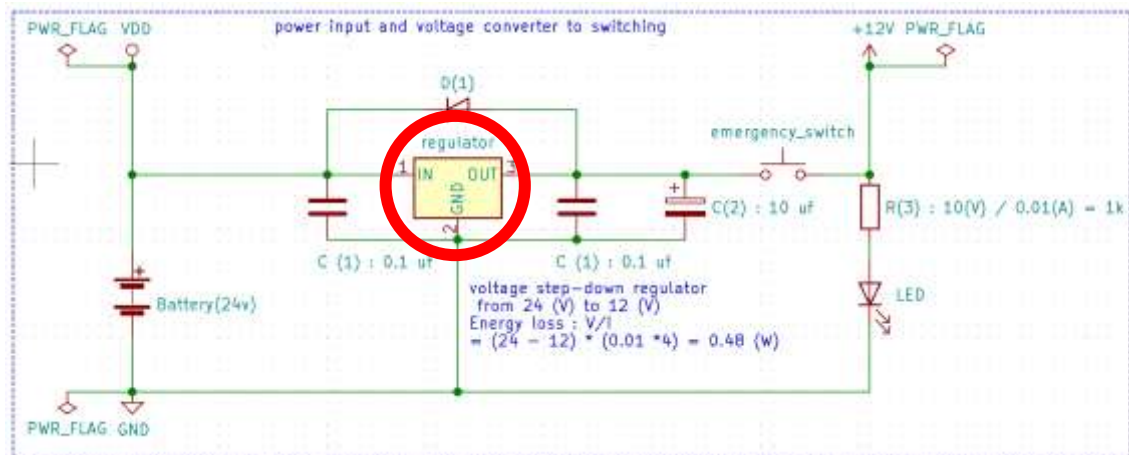


図 22 3 端子レギュレータの位置



図 23 3 端子レギュレータ

図 22 の丸で囲んだ部分が図 23 に示された 3 端子レギュレータと呼ばれる素子です。バッテリーの右側回路は基本的にすべてこの端子を動かすために必要なコンデンサ類です。

3 端子レギュレータとは、入力された電圧を、指定された電圧に変圧してくれる素子です。今回はバッテリーからの 24 V を 12 V に降圧するために用いています。

なぜ 12 V に降圧しているのか？それは使用している n-MOSFET の V_{GS} 絶対定格が最大 20V であったためです。バッテリーからの電圧をそのまま入力してしまうと n-MOSFET を破壊してしまうため、降圧する必要があるわけです。

降圧するだけなら、分圧用の抵抗を直列つなぎにしてもよさそうですが、今回の電

圧源であるモーター用バッテリーは、モーター駆動時に大電流を流すため、一時的に電圧が大きく変動します。この時、降圧する為に抵抗を用いていた場合は、その電圧変動の影響を直接受け、結果として n-MOSFET の動作を不安定化させてしまいます。これを防ぐために安定的に電圧を供給することのできる 3 端子レギュレータを採用しました。

3 端子レギュレータの両端にはコンデンサがついています。これらはどちらも電圧安定化、ノイズ除去のための素子です。本来ならば、左側にももう一つ容量の大きいコンデンサを配置したいところですが、先ほど説明した通りモーター用バッテリーは、モーター駆動時に大電流を流すために電圧変動が大きく、多少容量の大きなコンデンサを配置してもあまり効果をえられないと考えられたので省略しています。

(ノイズ除去用コンデンサについての詳細はここでの説明は省きます。基本的には使用する 3 端子レギュレータの仕様書に従って問題ありません。)

2.2.2. LED

LED が emergency Switch の後に接続されています。この LED はモータードライバ等への電源供給が行われていることを示すインジケータです。

LED の抵抗値の決定は、LED の電圧降下を意識して設計する必要があります。LED は一般に 1~2V の電圧降下を引き起こします。今回 LED へ与えられる電圧は 12V です。抵抗にかかる電圧は $12 - 2 = 10\text{ V}$ です。今回 LED へ流れる電流は 10 mA と定め、抵抗値はオームの法則より、 $1\text{ k}\Omega$ としました。

2.3 電圧監視回路

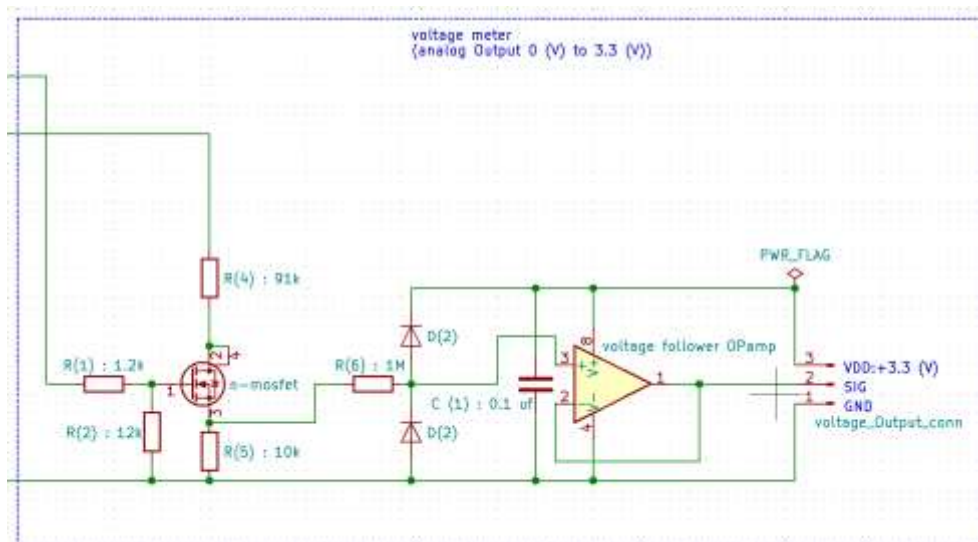


図 24 電圧監視回路

電圧を監視するために作成した回路です。この回路は大きく分けて次の 3 つの回路に分

割されます

- ・ 分圧回路
- ・ クランプ回路
- ・ ボルテージフォロア回路

クランプ回路，ボルテージフォロア回路は両方ともマイコン保護用回路です。
それぞれ確認しながら解説します。

2.3.1. 分圧回路

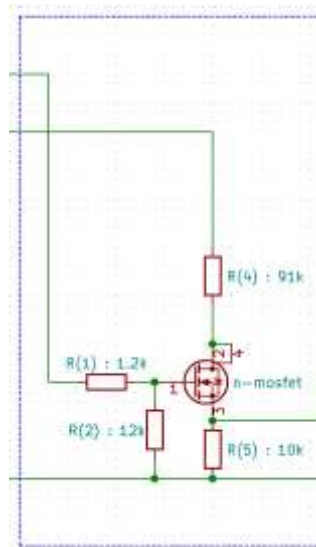


図 25 分圧回路

2.1 章で解説した n-MOSFET を利用した回路で，ヒューズを排し，その代わりに抵抗が 2 つ導入されています。

この 2 つの抵抗は，およそ 9:1 の比になるように設計しています。これは入力電圧が最大 30V の時，出力電圧が 3V になるようにするためです。入力電圧を最大 30V としたのは，安全率のためです。マイコンが壊れると制御系がすべてダウンしてしまうため，余裕を持った安全率を設定する必要があります。また出力電圧が 3V とした理由は，マイコンが計測できる電圧値の範囲が 0~3.3V となっているためです。

ここはただの分圧回路ですので解説は省略します。

2.3.2. クランプ回路

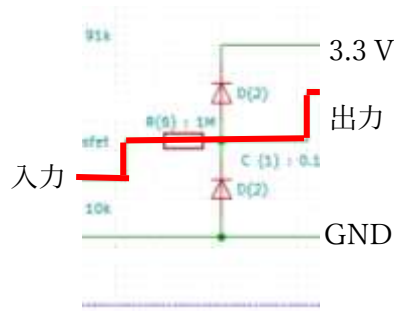
参考資料：[A-D コンバータとアナログ入力のインターフェース](#)

図 26 クランプ回路

入力から出力への経路を赤い線で示す

クランプ回路とは保護回路の一つで、入力された電圧を、設定した電圧の範囲に補正する回路です。図 26 のように、入力から出力への経路を二つのダイオードで挟み込む(クランプ)ような形となっています。入力から出力の電圧は前述の通り基本的に 0~3V となっているので、二つのダイオードは逆方向の電圧がかかっています。そのため基本的にはこれらのダイオードは働きません。

これらのダイオードが働くのは、入力電圧が 0V を下回るとき(逆電圧)、あるいは 3.3V を上回るときです。先の設計が正しく働いていれば、これらの電圧になることはありませんが、何かしら異常が発生した場合はこれらの電圧を超えることが考えられます。その時にはそれぞれのダイオードが順方向となり電流が流れだし、電圧を変化させます。その結果として出力電圧を 0~3.3V の範囲内に収めることができます。

入力から出力の経路内に存在する抵抗は、電流制限用の抵抗です。この後解説するボルテージフォロア回路には(理論的には)電流が流れません。そのため通常は電流が流れませんが、先ほどの保護回路が働く際には電流が流れます。ただし、この電流が流れることによって、前段の分圧抵抗のインピーダンスが低くなり、正確な電圧計測ができなくなります(後述)。そのためなるべく電流を流さないように非常に大きい抵抗を用いています。

2.3.3. ボルテージフォロア回路

参考サイト : <https://detail-infomation.com/voltage-follower/>

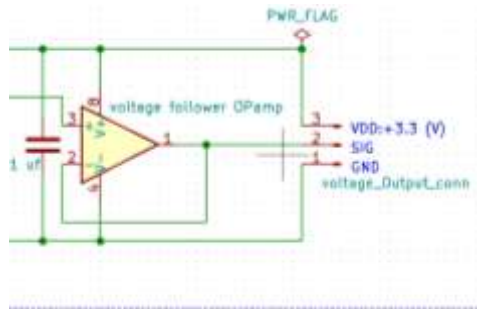


図 27 ボルテージフォロア回路と出力端子

ボルテージフォロア回路とはオペアンプを用いた回路で、入力された電圧を増幅率 1 で出力する回路のことです。



図 28 オペアンプ

オペアンプとは一般に入力された信号を増幅するなどといった働きを持つ素子で、よく音声波形信号を持つ微弱な電圧を、スピーカーなどで出力できる程度の電圧に増幅したりなどで使われます。

オペアンプは、回路の組み方次第で様々な働きをします。今回はいくつかある回路のうち、ボルテージフォロア回路と呼ばれる回路を採用しています。

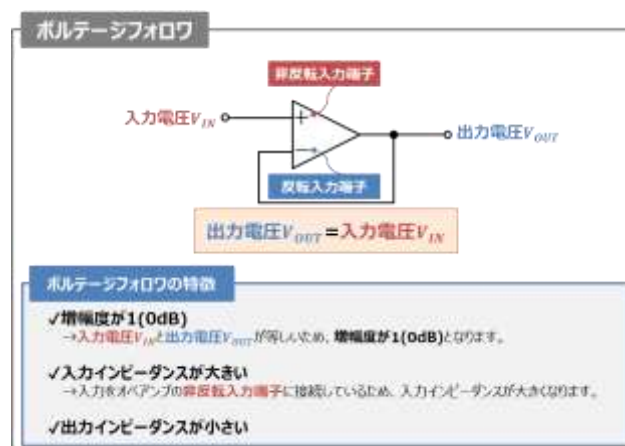


図 29 ボルテージフォロア回路の説明

ボルテージフォロア回路の特徴は図 29 に示している通りです。入力された電圧をそのまま出力することができる回路なのですが、そのまま電圧を伝えるだけならただ導線をそのままつなげれば同じことが可能ですね。なぜただ導線でつなぐのではなくわざわざこの回路を導入しているのでしょうか？

その理由は図 29 に書いてある通り、入力インピーダンスが非常に高いことが理由です。クランプ回路の項で抵抗値の説明した際、電流が流れることでインピーダンスが低下し正しく電圧計測ができなくなることを説明しました。ここについてももう少し簡単に説明します。

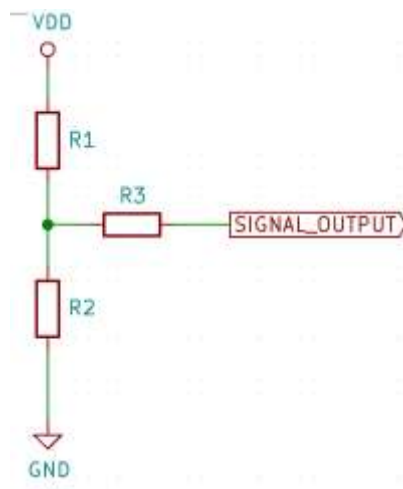


図 30 分圧回路の模擬図

図 30 は図 24 の回路から余計なものを排した回路です。 V_{DD} が $R1, R2$ の二つの抵抗によって分圧され、 $R2$ の電圧が $R3$ を通って SIGNAL_OUTPUT, つまりマイコン等の制御機につながります。 SIGNAL_OUTPUT のその先には GND がつながっていると想像してください。

さて、ここで簡単な思考テストをしてみましょう。この時、 $R1$ に流れる電流が(わかりやすく)1A だったとしましょう。この時、 $R2$ の電圧はいくつになるのでしょうか？

もし仮に、 $R1$ に流れる電流がすべて $R2$ へ流れたとするならば (= $R3$ 抵抗がないものとして見ることもできるので)、 $R2$ の電圧は単純に

$$V_{R2} = V_{DD} * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

で計算できますね。 (5)式であれば正しく分圧していることを理解できるかと思います。しかし、 $R3$ へ電流が流れると、 $R2, R3$ の並列抵抗となり、 $R2$ の電圧は、

$$V_{R2} = V_{DD} * \frac{\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} \quad (6)$$

のようになります。こうなると設計通りの分圧ができず、正しく計測できなくなってしまう。 (6)式のようにならないためには、 $R3$ へ流れる電流が無いようにする必要があります。電流を流さないようにするということはつまり、 $R3$ が無限大の抵抗値(インピーダンス)になればよいですね。

オペアンプは理想的な基本特性の一つとして、入力インピーダンスが無限大となる特性があります。つまり、入力電流が0となります。電圧計測にうってつけの素子なわけです。

以上の回路を組むことで、マイコンに過度な電圧入力が行われることを防ぎ、安全にかつ正確に電圧計測が行えるようになります。

終わりに

ここまで、スイッチング回路について解説してきました。

冒頭でもお伝えしましたが、この回路は実際に制作されたものではありません。実際に制作するときには改めて使用する素子の特性を踏まえて抵抗値などの設計を見直す必要があります。 決してここに書いてあるパラメータが最適解なのだ、と思わないでください。 自分で素子のデータシートを読み込み、またその素子の使い方をよく調べて実装し、きちんと動作試験を行い、異常がないか確かめてからロボットに組み込んでください。

このドキュメントでは、素子の使い方に注目して解説してきました。しかし、その素子がどうしてそのように動くのか、を理解しておくこともとても大切です。十分に各素子の基礎原理をしり、適切な使い方ができるように学んでください。

幸いなことに、電子回路については親切なドキュメントがネット上に数多く公開されています。中には間違い、あるいはそのまま実装すれば危険な回路もあります。様々な情報と照らし合わせて回路制作を行ってください。

以上、長々と説明し、非常に見にくいドキュメントとなっているかと思いますが、ひとまず第一版として締めさせていただきます。時間があれば、より洗練して分かりやすいドキュメントにしようかと思っています。