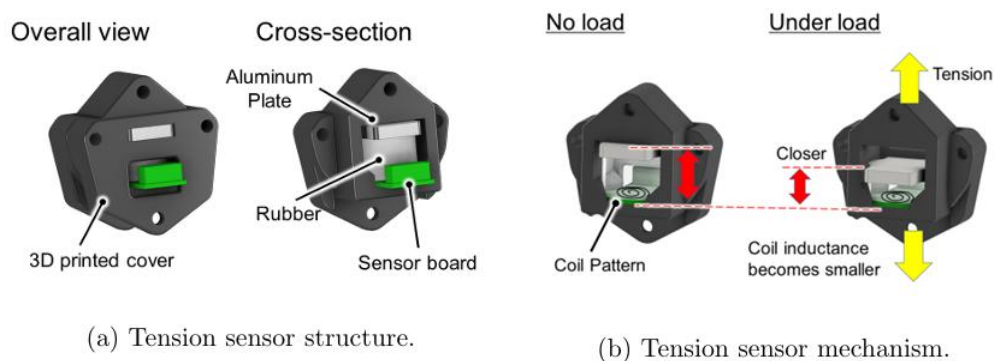


概要



コイルのインダクタンス値変化を用いて張力を計測するセンサ。

センサ両端に張力が加わった時、センサ内部の金属板とコイル間の距離が変化し、コイルのインダクタンス値が変化する。張力とインダクタンス値を対応付けることで張力を計測する。

[先行研究](#)で扱われていた同様の原理のセンサを、インソールセンサシステムのノウハウを使って、サイズやセンサ値取得のしやすさを改良した。

このセンサを使って張力フィードバックを実装した論文が公開されているので、論文で言及するときは[コレ](#)を引用すること。

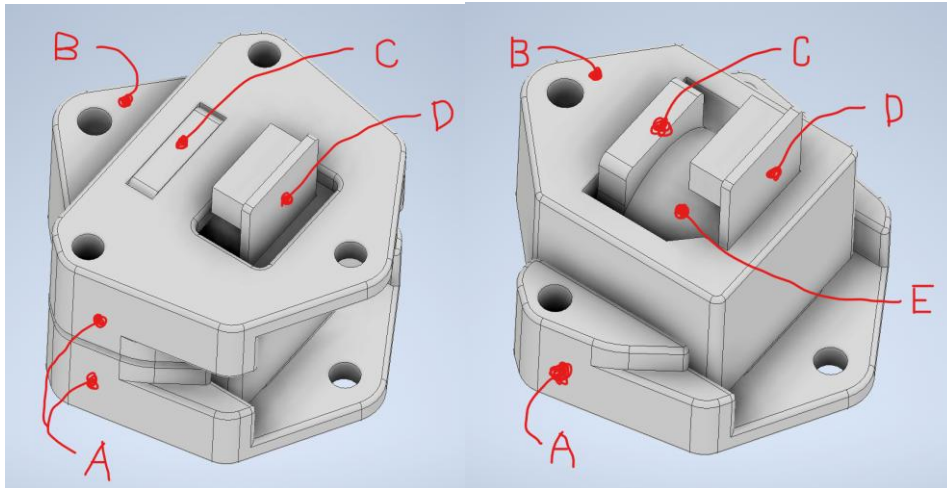
Inventorデータ

[sensor_case_ver3_0.ipt](#)

- A, B : 3Dプリンタパーツ (Onyx , 確かカーボンmaxで入れたはず...)
- C : アルミ (3mm , 切削加工)
- D : センサ基板
- E : ゴム

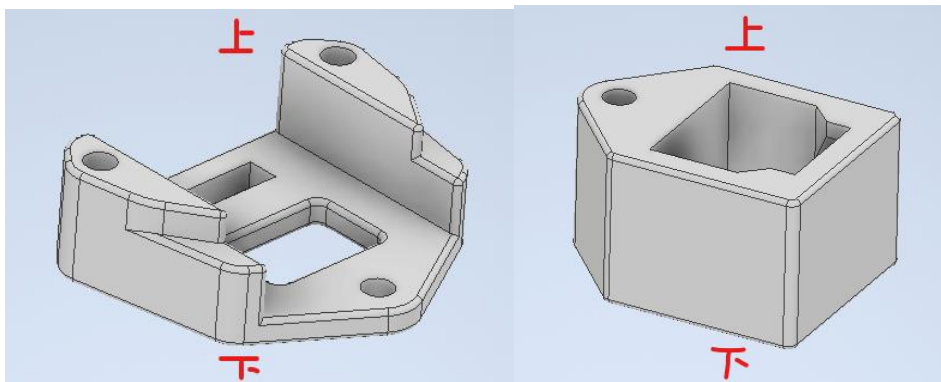
ゴムはMISUMI「[ゴムクッションフリー指定タイプ](#)」の[RBCXU-D16-L10](#)。

※外形はそのままデョアを他数種類から選択可能。



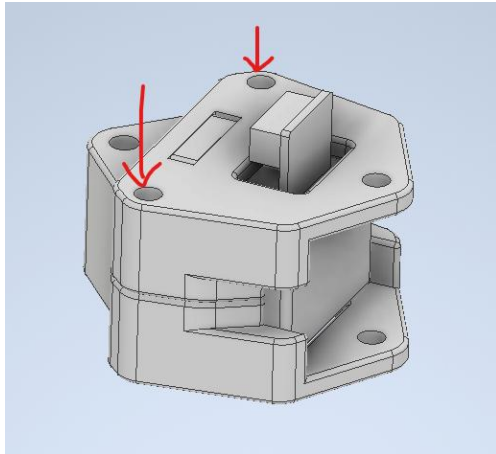
造形方向

- 左画像：A
- 右画像：B



組立

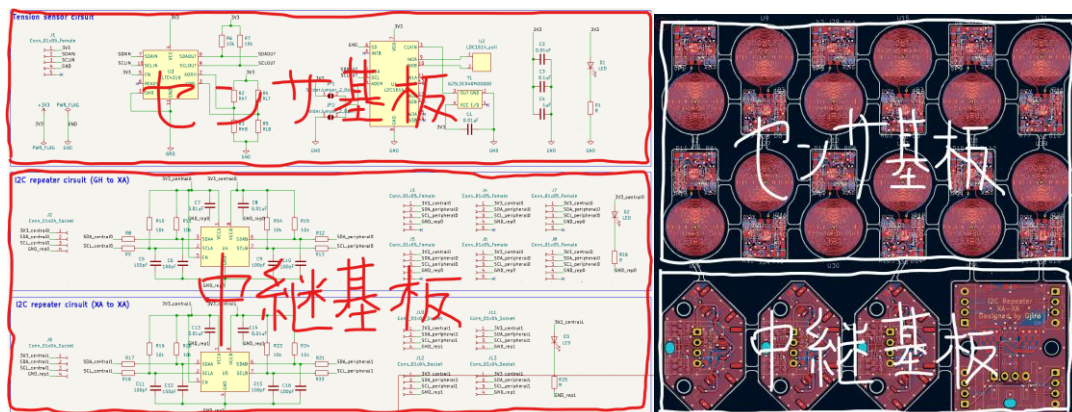
矢印の穴にM3の長さ25mmのボルトを通し，反対側をUナットで固定する．
 プリンタパーツの厚みが22mmあり，ボルトのねじ部が3mmしか残らないので，厚みのあるゆるみ止めナットは使わないほうが良い．Uナットであれば3mmくらいの厚みのものがあるので，ゆるみ止めナットよりもUナットを使うことを推奨．ボルトを締めすぎるとOnyxがつぶれてセンサの形状が変わってしまうので注意．



KiCADデータ

KiCAD全体のデータは [ここ](#)

二種類の役割を持つ回路の基板データが一つのデータに含まれている。以下では、それぞれを「センサ基板」、「中継基板」と呼ぶ。



それぞれの役割

センサ基板

コイルのインダクタンスを読み取る[LDC1614](#)を用いたセンサ本体基板。LDC1614は、マイコンとの通信にI2Cを用いるが、固有のI2Cアドレスを2つまでしか割り当てられない。そこで、[LTC4316](#)を導入することでセンサに割り当てられる固有のI2Cアドレスを合計36個まで増やしている。**割り当てるアドレスごとに実装する部品が異なることに注意。以下に詳細を記載。**

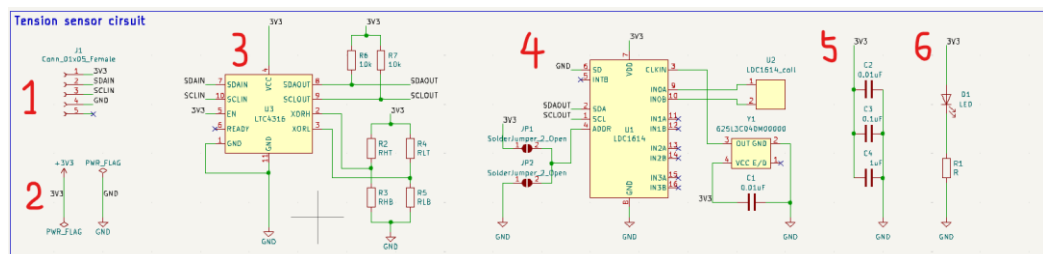
中継基板

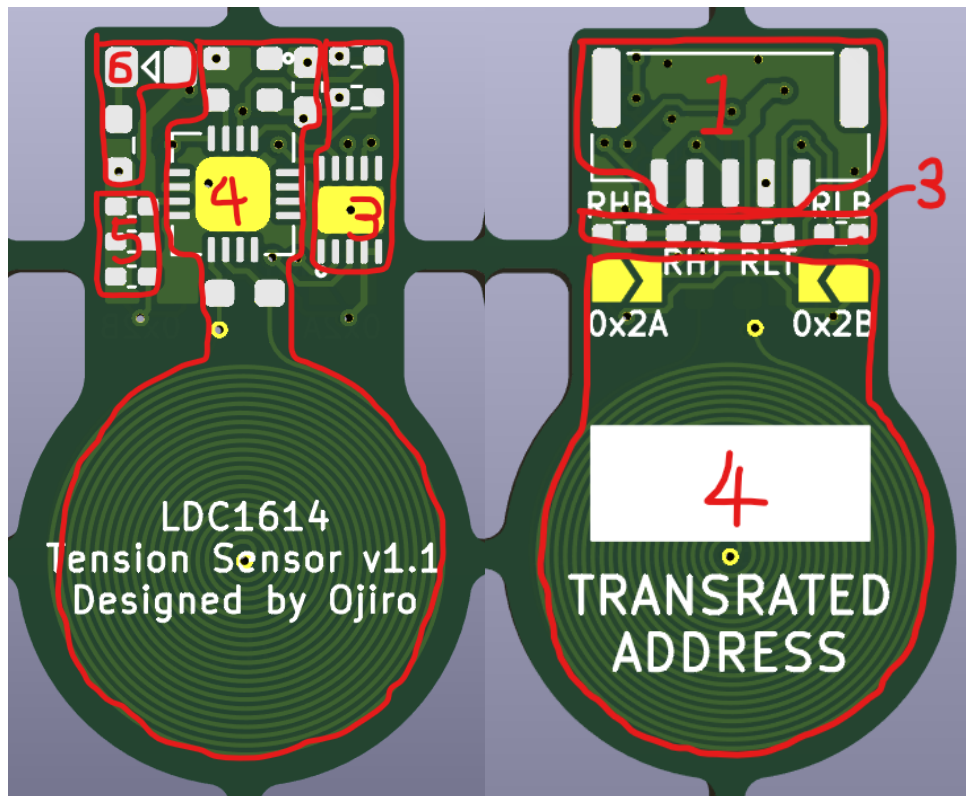
[PCA9517](#)を用いたI2Cリピータ基板。I2Cの仕様では、長い配線を用いた通信を想定しておらず（せいぜい20~30cmくらい）、配線が長すぎると正常な通信ができなくなる。センサとマイコン間の距離が長くなる時は、この基板を間に挟むことによって、通信距離を安全に延長することができる。

また、この基板を用いることで、I2Cのバスを枝分かれできるように設計している。センサ基板にGHコネクタを採用していることから、GHからXA、XAからXAに、I2Cを中継かつ枝分かれ可能な二種類の回路を準備している。

回路詳細

センサ基板





1. コネクタ
2. KiCAD電源設定
3. LTC4316周辺回路
4. LDC1614周辺回路
5. LDC1614電源コンデンサ
6. 電源LED

LDC1614への割り当てアドレス選択

LDC1614のADDRピンの電圧レベルをHighまたはLowレベルにすることによって、LDC1614に0x2Aまたは0x2BどちらかのI2Cアドレスを割り当てることができる。はんだブリッジのどちらかをショートさせることで、シルクに対応したアドレスを割り当てることができる。**同時にショートさせないこと。**

LTC4316によるアドレス変換

LTC4316を介すことで、上記の方法で割り当てたLDC1614のI2Cアドレスを、リアルタイムに違うアドレスに変換する。RHTとRHB、RLT

とRLBに割り当てる抵抗値によって、変換するアドレスを決定する
(それぞれ基板データ状のR2, 3, 4, 5に対応)。元のI2Cアドレス (7bit) と、RHTとRHB、RLTとRLBの組で決まった7bit変換用アドレスのXORをとった値が、変換後のI2Cアドレスとなる。7bit変換用アドレスのうち、上3bitがRHTとRHB、下4bitがRLTとRLBに割り当てる抵抗によって決まる。指定の抵抗値の製品を使っても変換がうまくいかなかったことがあるので、下記の表で赤丸で囲んだ組み合わせとその再現を確認した製品を使うことを推奨する(RLT: 681k Ω , RLB: 1M Ω の組は実装したことないが、RLT: 1M Ω , RLB: 681k Ω の組は問題なく機能したのでできるはず)。

Table 2. Setting the Resistive Divider at XORL

LOWER 4-BIT OF TRANSLATION BYTE				V_{XORL}/V_{CC}	RECOMMENDED R_{LT} [k Ω]	RECOMMENDED R_{LB} [k Ω]
a3	a2	a1	a0			
0	0	0	0	≤ 0.03125	Open	Short
0	0	0	1	0.09375 ± 0.015	976	102
0	0	1	0	0.15625 ± 0.015	976	182
0	0	1	1	0.21875 ± 0.015	1000	280
0	1	0	0	0.28125 ± 0.015	1000	392
0	1	0	1	0.34375 ± 0.015	1000	523
0	1	1	0	0.40625 ± 0.015	1000	681
0	1	1	1	0.46875 ± 0.015	1000	887
1	0	0	0	0.53125 ± 0.015	887	1000
1	0	0	1	0.59375 ± 0.015	681	1000
1	0	1	0	0.65625 ± 0.015	523	1000
1	0	1	1	0.71875 ± 0.015	392	1000
1	1	0	0	0.78125 ± 0.015	280	1000
1	1	0	1	0.84375 ± 0.015	182	976
1	1	1	0	0.90625 ± 0.015	102	976
1	1	1	1	≥ 0.96875	Short	Open

Table 3. Setting the Resistive Divider at XORH

UPPER 3-BIT OF TRANSLATION BYTE			V_{XORH}/V_{CC}	RECOMMENDED R_{HT} [k Ω]	RECOMMENDED R_{HB} [k Ω]
a6	a5	a4			
0	0	0	≤ 0.03125	Open	Short
0	0	1	0.09375 ± 0.015	976	102
0	1	0	0.15625 ± 0.015	976	182
0	1	1	0.21875 ± 0.015	1000	280
1	0	0	0.28125 ± 0.015	1000	392
1	0	1	0.34375 ± 0.015	1000	523
1	1	0	0.40625 ± 0.015	1000	681
1	1	1	0.46875 ± 0.015	1000	887

I2Cアドレス0x2Aの変換結果	RHT : Open, RHB : Short 000	RHT : 1M Ω , R HB : 280k Ω 011	RHT : 1M Ω , R HB : 681k Ω 110
RLT : Open, RLB : Short 0000	0x2A	0x1A	0x4A
RLT : 1M Ω , RLB : 280k Ω 0011	0x29	0x19	0x49
RLT : 1M Ω , RLB : 681k Ω 0110	0x2C	0x1C	0x4C

RLT : 681k Ω , RLB : 1M Ω 1001	0x23	0x13	0x43
RLT : 280k Ω , RLB : 1M Ω 1100	0x26	0x16	0x46
RLT : Short, RLB : Open 1111	0x25	0x15	0x45

I2Cアドレス0x2Bの変換結果	RHT : Open, RHB : Short 000	RHT : 1M Ω , R HB : 280k Ω 011	RHT : 1M Ω , R HB : 681k Ω 110
RLT : Open, RLB : Short 0000	0x2B	0x1B	0x4B
RLT : 1M Ω , RLB : 280k Ω 0011	0x28	0x18	0x48
RLT : 1M Ω , RLB : 681k Ω 0110	0x2D	0x1D	0x4D
RLT : 681k Ω , RLB : 1M Ω 1001	0x22	0x12	0x42
RLT : 280k Ω , RLB : 1M Ω 1100	0x27	0x17	0x47
RLT : Short, RLB : Open 1111	0x24	0x14	0x44

※Openの場合は，何も実装しない．

※基板データにおいて，RHTはR2，RHBはR3，RLTはR4，RLBはR5に対応する．

部品リスト・フットプリント対応関係

- J1 : GHコネクタ縦向き5極
型番 : BM05B-GHS-TBT
- U1 : LDC1614

型番...LDC1614RGHR

- U2 : チップコンデンサ330pF , 0603(1608M)

型番指定なし ([例](#))

※センサ用コイルのフットプリントには部品実装不要

- U3 : LTC4316

型番...LTC4316CDD#PBF

- Y1 : 水晶発振器40MHz

型番指定なし ([例1](#) , [例2](#))

- D1 : チップLED , 0805(2012M)

型番指定なし ([例](#))

- R1 : チップ抵抗1k Ω , 0603(1608M)

型番指定なし

- R2, R3, R4, R5 : チップ抵抗 , 0402 (1005M)

Short (0 Ω) ...型番指定なし

280k Ω ...CRCW0402280KFKED

681k Ω ...RK73H1ETTP6803F

1M Ω ...RGC1/16SC105DTH

※Openの場合は , 何も実装しない .

- R6, 7 : チップ抵抗10k Ω , 0402 (1005M)

型番指定なし

- C1 : チップコンデンサ0.01 μ F , 0603(1608M)

型番指定なし

- C2 : チップコンデンサ0.01 μ F , 0402 (1005M)

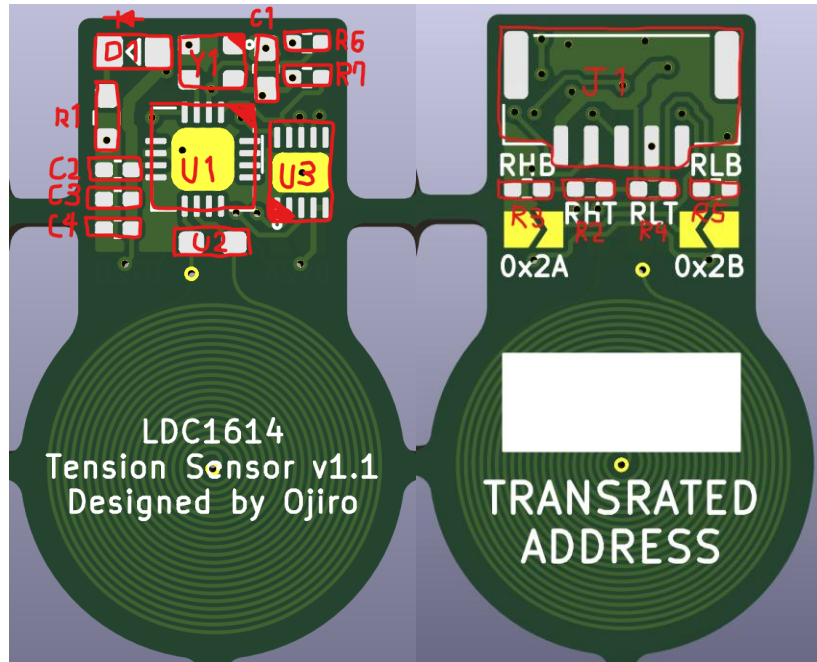
型番指定なし

- C3 : チップコンデンサ0.1 μ F , 0402 (1005M)

型番指定なし

- C4 : チップコンデンサ1 μ F , 0402 (1005M)

型番指定なし



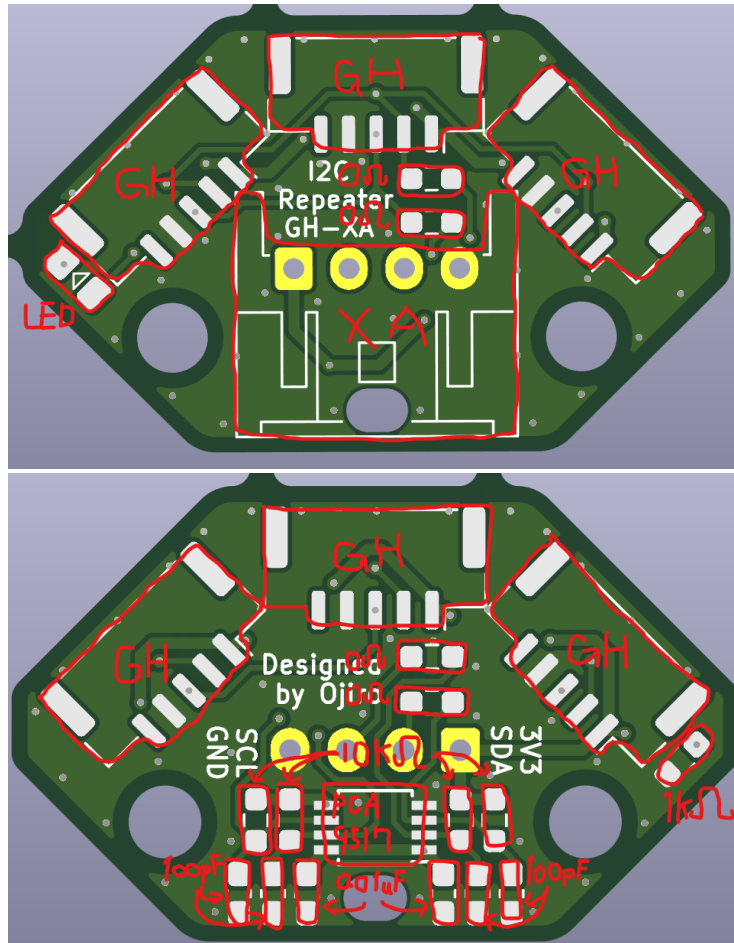
I2Cアドレスのメモ

センサ基板をはんだ付けした後に設定したI2Cアドレスを基板にメモしておくことを推奨する。「TRANSRATED ADDRESS」と書かれたシルクの上の白枠に油性マジックでアドレスを記入しておくこと。また、センサ基板をほかの部品と組み合わせるとセンサ基板が外部から見えなくなるので、GHコネクタ側面にもアドレスを記入しておくことも推奨。

中継基板

- GH-XA中継基板

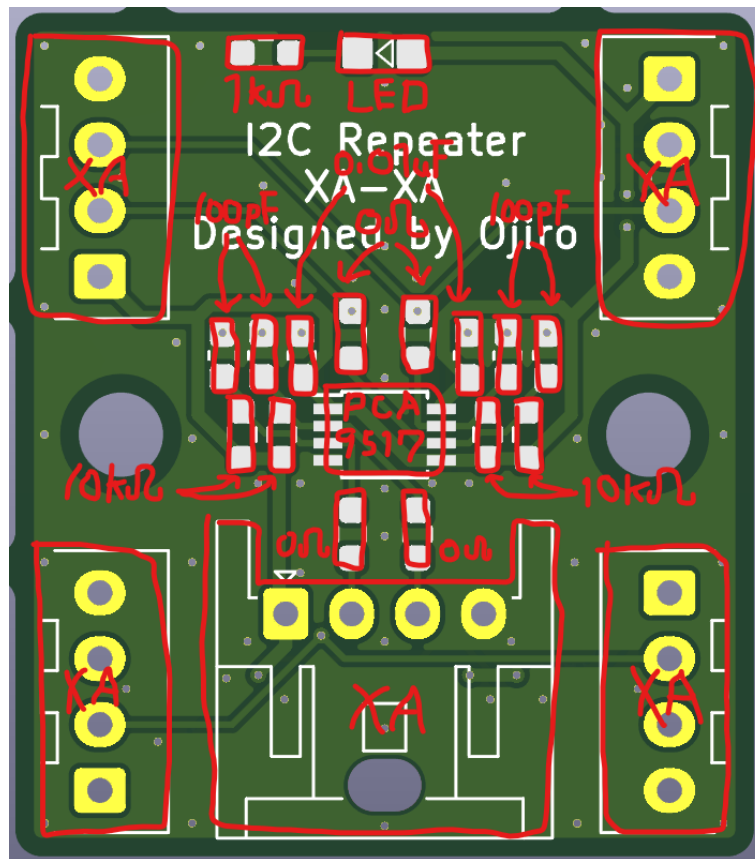
GHコネクタ（5極）6個分のI2Cバス分岐をXA（4極）コネクタ1個に集約する。PCA9517はPCA9517ADPのパッケージを利用。GH、XAのコネクタはサイド型を利用すること。チップLEDはセンサ基板と同じものが利用でき、各チップ抵抗、コンデンサのパッケージは0603(1608M)で、型番は指定なし。M3ボルトで固定することを前提とした穴がけられており、その間隔は18.5mm。



※下段の画像で示した基板の向きで，XAコネクタにおけるI2Cのピンアサインを表記している．

- XA-XA中継基板

XAコネクタ（4極）4個分のI2Cバス分岐をXAコネクタ（4極）1個に集約する．PCA9517はPCA9517ADPのパッケージを利用．XAコネクタは，トップ型4個，サイド型1個を利用すること．チップLEDはセンサ基板と同じものが利用でき，各チップ抵抗，コンデンサのパッケージは0603(1608M)で，型番は指定なし．M3ボルトで固定することを前提とした穴がけられており，その間隔は20mm．



※基板裏側にI2Cのピンアサインを表記している。

配線（GH）

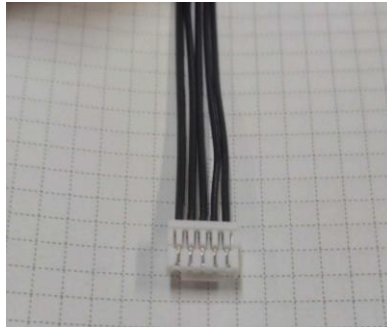
センサ基板と中継基板をつなぐためには，両端がGHコネクタとなっている配線を用いる。

材料

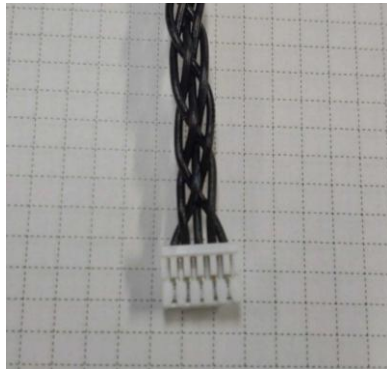
- [GHコネクタ5極](#)

- [GH 圧着端子付きリード線](#)

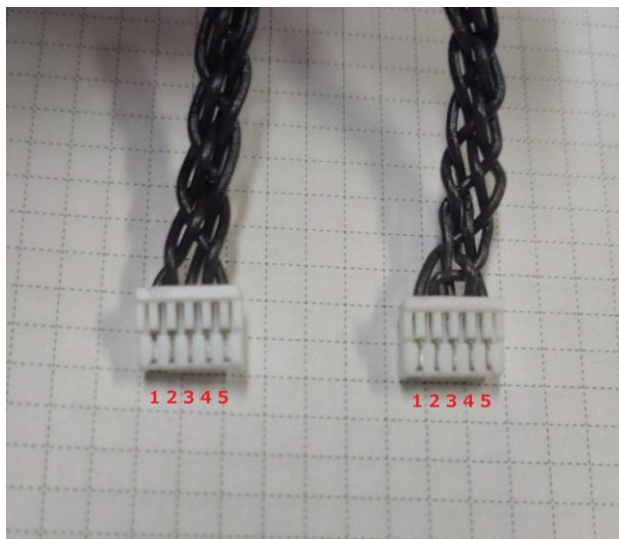
1. コネクタに配線を差し込む .



2. 5つ編みで編んでいく .



3. 画像のような対応関係になるようにもう一端をコネクタに差し込む .
テスタ等で導通確認を行う .



プログラム

[LDC1614_tension_sensor.ino](#)

Arduino UnoやArduino Mega用のプログラム．プログラム4行目のI2Cアドレスを対応するものに変更すること．出力される値はコイルのインダクタンス値で単位はuH．おおよそ7前後の値が表示されていれば，使用している基板は正常といえる．センサに張力が加わり，アルミ板とコイル基板の距離が縮まるとインダクタンス値は減少する．

※Arduino UnoやArduino Megaは5V系である一方，LDC1614は3.3V系なので厳密にはI2Cをレベル変換する必要があるが，最悪しくなくても動作する．

キャリブレーション

[calibrarion.xlsx](#)

張力センサにおもりを付け，値が十分に安定したときのインダクタンス値を計測した静的なキャリブレーションデータ．おもりは，30kgまで5kgずつ増やして計測を行った．試行回数はそれぞれ一回である代わりに，1000個分の連続データを取得し，平均値を計算している．

※静的なデータ計測結果なので，動的な張力と対応させるときには扱いに十分注意すること．もし対応させる場合は，動的なキャリブレーションでは値に違いが出る可能性があることを考慮して，使用すること．