

## Qvar センシング

### 概要

Qvar は、人の存在や動きの検出、タッチ検出、ユーザ・インターフェース(UI)などのアプリケーションに使用できる、ST マイクロエレクトロニクスの静電センサです。

このアプリケーション・ノートでは、構成と操作の観点から、Qvar センシング・チャネルに関するガイドラインを示します。

プラスチック製の床の上を歩いた後に金属のドアノブに触れると軽い電気ショックを受ける場合があります。ウールのセーターを脱いだときにも、電気の火花が生じたことがあるでしょう。子供たちはよく、風船を服に擦りつけて身体にくっつけて遊びます。こうしたよくある現象から、静電気または帯電は 2 つの異なる物体間の摩擦によって生じると結論づけることができます。実際、2 つの物体を物理的に密着させて擦合わせると、静電気が発生します。2 つの異なる物体を、物理的な摩擦なしで密着させた後に引離すだけで、両方の物体に静電気を帯びさせることができます。

すべての物質は原子から構成され、それぞれに正の原子核があり、それを複数の電子が取り巻いています。2 つの材料を擦るなどして物理的に密着させると、一方の材料が他方よりも電子を引寄せる性質が強く、一部の電子が一方から他方に引っぱられる場合があります。その後、材料を引き離すと、各材料の作用により、一方がより多くの電子を獲得し(負に帯電)、他方がその分の電子を失う(正に帯電)状態になります。このような現象は、しばしば摩擦電気(triboelectricity)または摩擦帯電(triboelectric effect)と呼ばれます。英語の接頭辞'tribo'は摩擦を意味します。摩擦電気の現象は、日常生活に広く存在しているため、静電センサを使用して人間の活動、機械システム、産業プロセスなど幅広い分野で検出や感知が可能です。

音響、抵抗、静電容量、圧電、光学、電磁気などの原理に基づいた、より確立されたセンシング手法に比べて、静電センサはそれほど一般的でなく、理解も進んでいません。しかし、静電センサは、コスト効率や感度の高さなど、他のセンサよりも明らかに優れた特性を備えています。

## 1

## 帯電センシングの原理

材料が他の材料、つまり固体または液体の表面と接触するたびに、材料上には帯電が生じることが想定されます。通常、帯電の度合いは予測できませんが、電極と電子信号処理回路を使用することで検出可能です。

信号は、電子回路から荷電粒子の移動で生じる電界の変動によって発生します。電極が絶縁体に埋込まれている場合、または電極と対象の個体または液体の表面が直接接触しない場合、センシング・プロセスは静電誘導によって実現されます。これに対して、電極が露出した状態にある場合は、電極と個体または液体間の物理的接触によって、電荷移動が発生します。

露出した電極を使用する場合、静電誘導と電荷移動の両方が発生しますが、多くの場合、電荷移動の作用が支配的です。絶縁された電極を、入力抵抗  $R_i$  の信号処理回路に接続すると、この回路は電子の流れを測定し、測定可能な出力を生成します。

静電センサは静電誘導または電荷移動によるセンシング原理に基づいており、電磁効果とは何の関係もありません。センサが静電誘導で動作する場合、センシング原理は等価な静電容量センサで説明できます。帯電した物体をコンデンサの平板としてモデル化し、電極自体をもう一方の平板としてモデル化することができるからです。電極を基準として帯電した物体が移動すると、2つの平板間の距離が変化し、それによって静電容量値が変化します。同様に、物体上の電荷量が時間とともに変化すると、これによって平板間の電圧が変化します。

$Q_{var}$  は電荷 ( $= Q$ ) の変化 ( $= var$ ) を表します。これは、準静電ポテンシャルの変化を測定できる、電位センシング・チャネルであり、次のようなアプリケーションを実現できます。

- 接触および非接触による人のモーション検出と歩行分析
- 人のプレゼンス検知
- ユーザ・インターフェース (UI)
- 水の検出

例として人の動きを取り上げてみましょう。人が歩いたり、足踏みしたり、跳上がったり、より一般的には環境と相互作用すると、それらの結果として静電気が発生し、人体内に電位 ( $U$ ) が帯電されます。

この静電ポテンシャルの変化は、数ミリ秒で終了します。これは人体が空気 ( $C_x$ ) または靴底 ( $C_s$ ) と床 ( $C_F$ ) を介してグラウンドと容量結合しているためです。

次の図には、立ち止まっている人と歩いている人が描かれ、それぞれに、図の下に示す電位と電荷量の記号が付記されています。

図 1. 立止まっている人と歩いている人

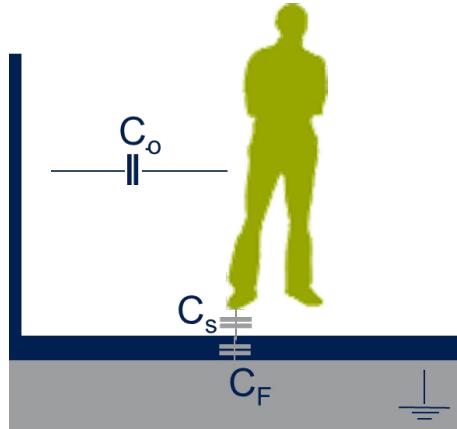


- $U_{BML}$  = 動いていない人体の電位
- $Q_{BML}$  = 動いていない人体の電荷量
- $dU_{BS}$  = 歩いている人体の電位
- $dQ_{BS}$  = 歩いている人体の電荷量

動いていない人体に注目すると、人体自体と環境との間の容量結合は、次の図に示すモデルに従って考えることができます。

図 2. 人体モデル

$$U_{BML} = \frac{Q_{BML}}{C_B}$$



人が歩くことによる  $U_{BS}$ (人の電位)の時間変化は、次のように計算できます。

$$grad U_{BS} = \frac{dU_{BS}}{dt} = Q_{BS} = \left( \frac{1}{\epsilon a S} \frac{dx}{dt} - \frac{x}{\epsilon a S^2} \frac{dS}{dt} \right)$$

ここで、

$x$  = 足から床までの距離

$S$  = 足と実際に接觸している床の面積

$\epsilon a$  = 靴底と床の間の空隙の誘電率

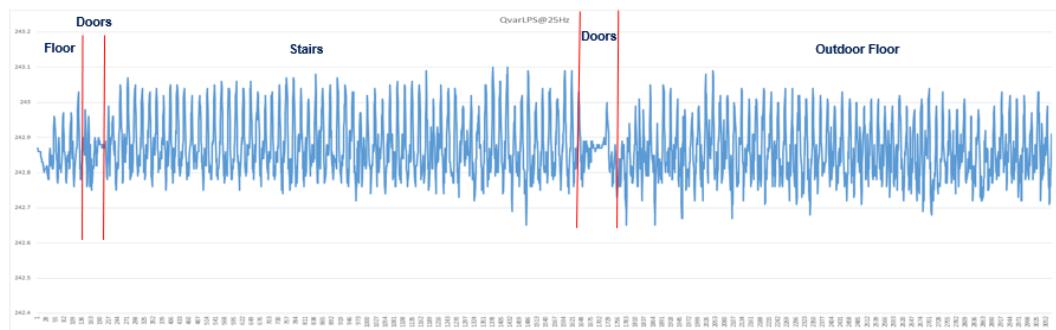
説明が必要な重要な記号が 2 つあります。

1 つ目は、 $dS/dt$  です。これは、靴底の動きによる電位変動への寄与を表しており、 $S$  は足が実際に地面に接觸している部分の面積です。

2 つ目は、 $dx/dt$  の比例項です。これは、 $x$  の変化による電位変動への寄与を表しており、 $x$  は地面と足の間の距離です。歩行は、逆方向の 2 つの動きの組み合わせです。一方の寄与が大きくなると、それに応じて他方の寄与が小さくなります。

次の図は、人体に電極を付けて(皮膚には非接觸)、連続して歩行した場合の Qvar センシング信号を表しています。

図 3. 屋内、屋外を歩行したときの Qvar 信号



具体的には、Qvar センシング・チャネルは、接続された電極に生じる電位差の変化を検出できます。

電極は、次のように様々な方法で配置できます。

1. 人体、皮膚への接觸なし
2. 人体、皮膚への接觸あり
3. 非接觸

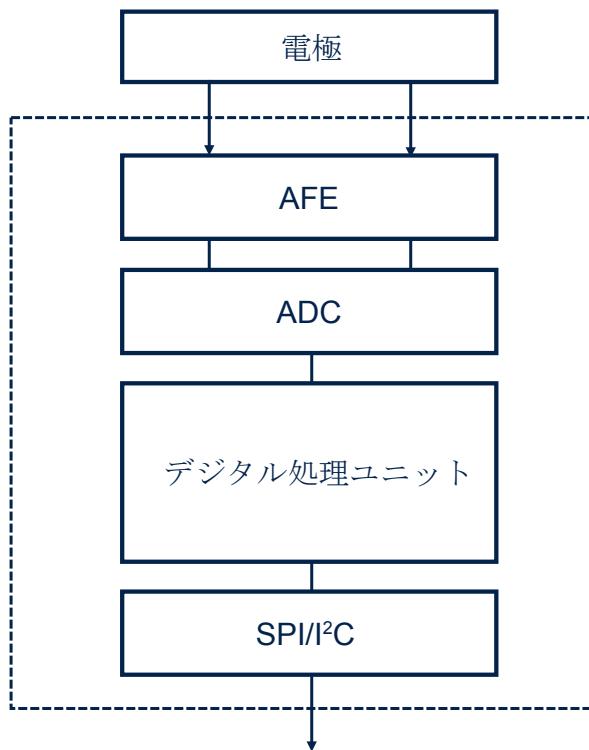
1 と 2 を Qvar on-body(接觸型)機能、3 を Qvar radar(レーダ)機能と呼んでいます。

UI や水漏れ検知のアプリケーションでは、専用の電極を検討する必要があります(セクション 5.1 ユーザ・インターフェース・アプリケーション向けの Qvar 参照)。

## 2 Qvar センシング・チャネルのアーキテクチャ

次の図は、外部電極を含むデバイスの大まかなブロック図です。

図 4. Qvar センシング・チャネルのアーキテクチャ



このアーキテクチャの主要ブロックには次のようなものがあります。

- 外部電極: Qvar によるセンシング・データ取得を可能にするには、1 つまたは 2 つの電極を適切なピンに接続する必要があります。電極の数とサイズは、具体的なアプリケーションに基づきます。
- Qvar アナログ・フロントエンド(AFE)
- アナログデジタルコンバータ(ADC)
- デジタル処理ユニット
- SPI または I<sup>2</sup>C 通信インターフェース

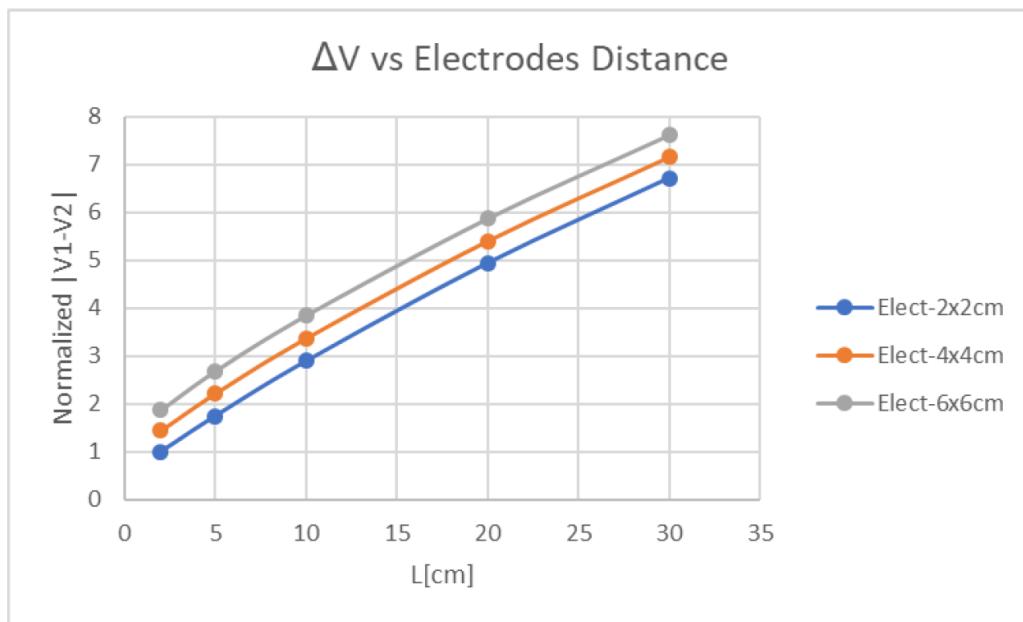
### 3 電極

電極のサイズ、形状、材料などの特性が、Qvar チャネルの測定結果を左右する可能性がある重要な要因であることはよく知られています。

たとえば、感度と電極面積の間には線形の関係があります。センサの感度は、電極面積の増加に伴い漸近的に増加します。

このような線形性はシミュレーション結果からも確認されます。次の図は、電極面積と電位差との線形関係を、電極間距離を 2cm~30cm の範囲で変化させて示したものです。

図 5. Qvar センシング・チャネルのシミュレーション結果



電極に一般的に使用される材料は、銅、銀、錫、または ITO(酸化インジウム錫)などです。電極の材料は、センサ感度に重要な役割を果たします。

通常、電極材料は導電性で、電気抵抗が低い必要があります。銅は他の材料に比べて抵抗が低いため(表 1 参照)、優れた導電性を示します。導体の抵抗が減少すると、電極内での電荷の移動能力が上昇します。このため、プリント基板上の電極として、ほとんどのアプリケーションで銅が使用されています。電極はプリント基板では表面金属層として構成されるため、短絡の防止や腐食抑制のため、通常はソルダー・レジストで保護されています。

表 1. 各種材料の抵抗率

材料	抵抗率 ( $\Omega \times \text{cm}$ )
銅	$1.68 \times 10^{-6}$
銀	$1.59 \times 10^{-6}$
錫	$1.09 \times 10^{-5}$
酸化インジウム錫	$1.05 \times 10^{-3}$

抵抗率の高い材料を使用すると、センサ感度が低下する可能性があることに注意してください。そのような場合は、抵抗を下げるために電極面積を大きくすることを推奨します。

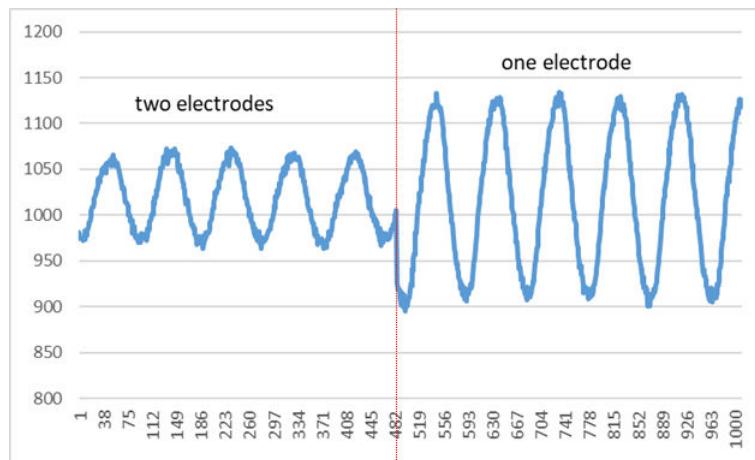
最後のポイントは、電極数とそれらの配置方法です。Qvar センシング・チャネルは、具体的なアプリケーションに応じて 1 つまたは 2 つの電極に接続できます。

次の図は、両方の電極構成(電極が 1 つの場合と 2 つの場合)での外部ノイズ信号の振幅の違いを示したものです。コモン・モード結合する交流は、2 つの電極を互いに近接させて(30cm 以内)配置すると減衰します。

電極間の距離を 30cm より大きくすると、外部ノイズの振幅は比例して大きくなるので、このパラメータはアルゴリズムによって補正する必要があります。

一般的に、電極のサイズと距離を適切に選べば、対象アプリケーションに対応する最適な信号対雑音比(SNR)が得られます。

図 6. 異なる電極構成の場合の 50Hz の外部ノイズ信号



Qvar センシング・チャネルは、1 つまたは 2 つの電極で動作できます。

これらの電極は、QVAR1 および QVAR2 ピンに接続する必要があります(ピンの説明と接続はデータシートを参照してください)。どちらの場合も、Qvar は差動モードで動作しますが、単一電極構成の場合、コモンモードが適切にキャンセルされないため静電界の変動に対する感度が大きくなります。この電極構成は、プレゼンス検知に推奨されます。

2 つの電極による構成は、電力線ノイズが大きい場合に推奨されます。この構成はノイズを減衰するためです。2 つの電極を使用するもう 1 つの理由として、到来方向の検出が挙げられます。一方の電極を他方から遠く離して配置すればセンシング・ポイントが 2箇所になるため、Qvar 信号の符号に基づいて、到来方向を検出できます。

2 つ目の電極を使用しない場合、これに対応するピンはフローティングのままで構いません。

## 4 データ・サンプリングのためのレジスタ設定

Qvar を有効にし、使用するための設定パラメータは、個々のセンサで異なります。次のセクションでは、Qvar を組み込んだセンサの詳細と、Qvar をオンにしてデータを読み出す手順を解説します。各センサは、Qvar のデータレディ割込みをセンサの割込みピンへ出力できます。

Qvar バッファの等価入力インピーダンスを選択できる場合もあります（サポートされている場合）。この件に関する詳細は、データシートを参照してください。

データの書き込みおよび読み出しに使用される疑似命令セットは以下のとおりです。

```
Write(register_to_write, data_to_write); MultiRead(register_to_read, pointer_to_data_buffer, data_bytes_to_read);
```

### 4.1 ILPS22QS

Qvar を有効にするには、次の命令を実行します。

- `Write(0x10, 0x08); // ODR set to 1Hz`
- `Write(0x12, 0x80); // QVAR_enable`

ODR は大気圧センサと共有されています。値に関する詳細はデータシートまたは該当するアプリケーション・ノートを参照してください。

次に、出力データを読み出すには、レジスタ 28h、29h、2Ah を読み出す必要があります。

- `MultiRead(0x28, (uint8_t*)&qvar_out, 3)`

Qvar のデータは変数 `qvar_out` に LSB 表記で格納されます。この値を mV に変換するには、次の式でこのセンサの `Qvar_Gain` の値(438000)を使用します。

- $\text{value[mV]} = \text{value[LSB]} / \text{Qvar_Gain}$

この出力レジスタは大気圧センサのレジスタと同じであることに注意してください。そのため、Qvar を有効にすると大気圧の出力は読み出せなくなります。

Qvar ピンには、データシートで推奨されている外部接続および電極のネットワークを確実に実装してください。

### 4.2 LSM6DSV16X

Qvar を有効にして、データレディ割込みを INT2 に出力するには、次の命令を実行します。

- `Write(0x10, 0x07); // accelerometer turned ON in high-performance mode`
- `Write(0x11, 0x07); // gyroscope turned ON in high-performance mode`
- `Write(0x16, 0xC0); // QVAR_enable, QVAR_DRDY_INT2 active`

さらに、出力データを読み出すには、レジスタ 3Ah、3Bh を読み出す必要があります。

- `MultiRead(0x3A, (uint8_t*)&qvar_out, 2)`

Qvar のデータは、240Hz 固定の ODR で変数 `qvar_out` に LSB 表記で格納されます。この値を mV に変換するには、次の式でこのセンサの `Qvar_Gain` の値(78)を使用します。

- $\text{value[mV]} = \text{value[LSB]} / \text{Qvar_Gain}$

さらに、Qvar データは、FIFO に格納(COUNTER\_BDR\_REG1(0Bh)レジスタの `QVAR_BATCH_EN` ビットを 1 に設定)したり、MLC/FSM 機能により処理することも可能です。CTRL7(16h)レジスタの `QVAR_C_ZIN_[1:0]` ビットを適切に設定することで、Qvar バッファの等価入力インピーダンスを選択できます。最後に、CTRL10(19h)レジスタの `QVAR_SW` ビットにより、QVAR1 ピンと QVAR2 ピンに接続する入力電極を内部で入換えることができます。

Qvar ピンには、データシートで推奨されている外部接続および電極のネットワークを確実に実装してください。

## 4.3 LSM6DSV16BX

Qvar を有効にして、データレディ割込みを INT2 に出力するには、次の命令を実行します。

- Write(0x10, 0x07); // accelerometer turned ON in high-performance mode
- Write(0x11, 0x07); // gyroscope turned ON in high-performance mode
- Write(0x16, 0xCC); // QVAR\_enable, QVAR\_DRDY\_INT2 active, both pins active

さらに、出力データを読出すには、レジスタ 3Ah、3Bh を読出す必要があります。

- MultiRead(0x3A, (uint8\_t\*)&qvar\_out, 2)

Qvar のデータは、240Hz 固定の ODR で変数 qvar\_out に LSB 表記で格納されます。この値を mV に変換するには、次の式でこのセンサの Qvar\_Gain の値(78)を使用します。

- $value[mV] = value[LSB] / Qvar\_Gain$

Qvar ピンは、CTRL7(16h)レジスタの AH\_QVAR1\_EN および AH\_QVAR2\_EN ビットにより別々に有効にできるため、シングルエンド・モードでも、差動モードでも動作させることができます。

さらに、Qvar データは、FIFO に格納(COUNTER\_BDR\_REG1(0Bh)レジスタの AH\_QVAR\_BATCH\_EN ビットを 1 に設定)したり、MLC/FSM 機能により処理することも可能です。CTRL7(16h)レジスタの AH\_QVAR\_C\_ZIN\_[1:0]ビットを適切に設定することで、Qvar バッファの等価入力インピーダンスを選択できます。最後に、CTRL10(19h)レジスタの AH\_QVAR\_SW ビットにより、QVAR1 ピンと QVAR2 ピンに接続する入力電極を内部で入れ換えることができます。

Qvar ピンには、データシートで推奨されている外部接続および電極のネットワークを確実に実装してください。

## 5 アプリケーション例

Qvar は、電極がユーザに接触したときに高精度で電荷変動を検出することで、ユーザ・インターフェース(UI)を改善、簡素化するために使用できます。

セクション 4 データ・サンプリングのためのレジスタ設定の説明に従って Qvar センサをオンにすることで UI を有効にできます。その後、センサのデータを専用のファームウェア機能で処理するか、セクション 5.3 FSM 使用時のレジスタ設定に示した設定のいずれかを使用して、ステート・マシン(FSM)に直接入力してリソースと電力の消費を節約することも可能です。

### 5.1 ユーザ・インターフェース・アプリケーション向けの Qvar

ユーザがデバイスに触れて操作する方式では、ボタンが最も一般的な手法であるものの、タッチ検出インターフェースの方がはるかに清潔でコスト効率に優れています。

Qvar は、単純な電極をセンサに接続することで、タッチ、押下はもとより、スワイプまで検出できる高感度のタッチ・インターフェースとして使用できます。

電極に対して考えられるすべての操作をマイクロコントローラで動作するアルゴリズムによって検出できます。または、機械学習コア(MLC)とステート・マシン(FSM)の機能を使用できるセンサで直接検出することもできます。

セクション 5.3 FSM 使用時のレジスタ設定では、FSM の例を 2 つ紹介しています。1 つは、イン・イヤーの検出アルゴリズムの例、もう 1 つは、単一の構成でタッチ、ダブル・タッチ、トリプル・タッチ、長押し、スワイプのすべてを検出する例です。

#### 5.1.1 タッチ・センシング用の電極

タッチまたは長押し(長時間タッチ)は、Q+または Q-(データシートの QVAR1/QVAR2)と GND の 2 つの信号を使用して検出できます。

ユーザが Q+ と GND の領域に同時にタッチできる構造である必要があります。その構造さえ維持できれば、さまざまな設計が可能です。

社内試験では下図に示したような電極を使用しました。4 ピンのコネクタによる構成のため、4 つの電極(GND、Q+、GND、GND の順)を使用しましたが、タッチ判定には 2 つの電極で十分です。

これらのピンは、フレキシブル基板上にプリントされ、接触面(銅)が露出しています。このように、ユーザが触れられる筐体表面に電極を配置することが理想です。

基板の先端の露出した銅が電極として動作します。

ユーザが触れた場所が、GND 電極と Q+ 電極、または GND 電極と Q- 電極のペアである場合、センサが大きな電荷の変化を測定し、出力信号が飽和します。Qvar 出力信号が飽和する時の極性は、Q+ と Q- のどちらに触れるかによって決まります。

このようにしてタッチまたは長時間タッチを把握します。

図 7. フレキシブル電極の例



この例の電極寸法は 10mm x 10mm ですが、タッチ検出用の電極のサイズは、距離を隔てた存在検知の場合ほど重要ではありません。

このレイアウトは、両方の電極を小さな指先の表面で簡単に接触できるため、タッチ検出で使用可能です。電極のもう一つの例を下図に示します。プリント基板にプリントされ、Q+と GND の信号が前の例とは異なるパターンで交互に配置されています。前の例との違いはパターンのみで、同様に電極サイズは重要ではありません。

図 8. タッチ検出用のプリント基板電極の例



一方に Q+と GND を使用し、もう一方に Q-と GND を交互に配置してタッチ領域を構成することで、2ヶ所のタッチ UI インタフェースを実装できます。

どちらのタッチ領域が触れられたかによって、Qvar 出力が飽和する極性が決まります。両方のタッチ領域が同時に押された場合、信号は通常ローレベルに飽和しますが、経路のインピーダンスの違いに応じて状況が変わる可能性があり、Q+が支配的になる場合もあります。

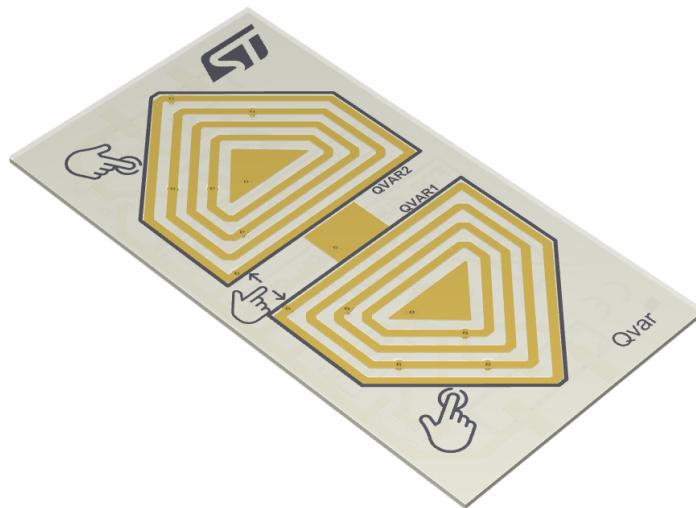
## 5.1.2 スワイプ・センシング用の電極

セクション 5.1.1 タッチ・センシング用の電極で説明した 2 つの「タッチ領域」を使用すると、スワイプ操作の方向検出(スワイプ検出)が可能です。

スワイプ検出アプリケーションの原理は、ユーザが一方のタッチ領域ともう一方のタッチ領域を素早く連続してタッチすると(まず一方の Qvar 入力を GND に短絡させ、その後もう一方の入力を GND に短絡させると)、Qvar 出力信号が一方の飽和端からもう一方の飽和端に移行するというものです。

試験に使用した電極の設計は下図のようなものです。

図 9. スワイプ検出用のプリント基板電極の例



両側の矢印は、一方は Q+ と GND、もう一方は Q- と GND の同心状の複数の層で構成されています。中央の四角形は GND に接続されています。

タッチ検出の場合と同様に、ユーザの指で Q と GND 電極とを同時にタッチができる電極構造にしてください。ここで重要なのは、Q と GND への同時タッチが容易であるということです。

スワイプを検出するにはアルゴリズムの実装が必要であることにも注意する必要があります。一般的な手法では、Q+ と Q- にそれぞれ 1 つの閾値を設定し、いずれか一方の電極が短絡したか(つまり、対応するタッチ領域触れられたか)を検出します。信号出力がこれらの閾値を順番に超えた場合、アルゴリズムは、1 方向へのスワイプを検出し、閾値を超える順序が逆の場合はスワイプの方向が逆であると判断します。

スワイプ検出の電極を構成すれば、アルゴリズムを工夫することで、2 つのタッチ領域のタッチ検出も実現できます。

## 5.1.3

## 水漏れ検出用の電極

水漏れ検出は、水が導体であり人間の指と同様に電荷を移動できるという前提で成立します。

タッチ電極と同じ原理で、2つの電極 Q+ (または Q-) と GND が水によって短絡されます。

水漏れ検出用の電極構造の例を下図に示します。電極構造はアプリケーションに合わせて変更できます。

図 10. 水漏れ検出用の電極の例



この構造体には、水により短絡される 2つの電極が配置されています。この構造体は、3D プリンタによって製作されたものです。

上図のようにこの構造体を水平に配置すると、水深が浅くても水漏れを検出できます。

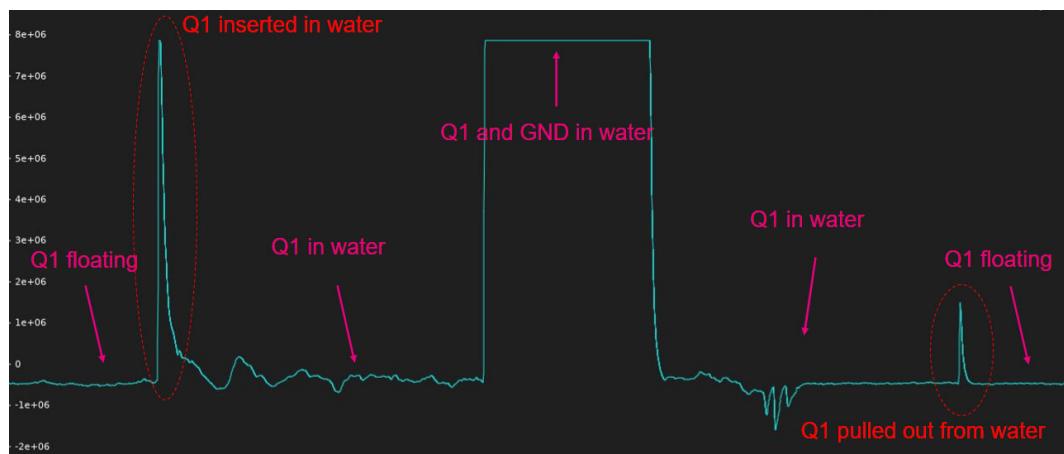
両方の電極が水に浸ると、Qvar センシング・チャネルと GND 間で短絡が生じます。

これによって、タッチ検出用電極と同様に、Qvar 出力信号が飽和します。

電極を垂直に配置した場合、水深が上側の電極まで達した時に Qvar の出力が飽和します。検出したい水深に応じて、2つの電極間の距離を調整してください。

下図に示したように、電極の一方だけが水に触れ、もう一方がフローティングのままの状態は Qvar 出力信号のノイズに注目することで、両方の電極に水が触れる場合と区別ができます。

図 11. 水漏れ検出の例



水検出アプリケーションを操作する際、水が検出水位より低い位置に戻っても金属リングを保持する構造の表面に水の層が残る可能性があります。

残った水の層が十分に厚い場合、短絡が発生して Qvar 出力信号が飽和する可能性があります。こうした理由から、電極を垂直方向に配置する構造の方がよいでしょう。

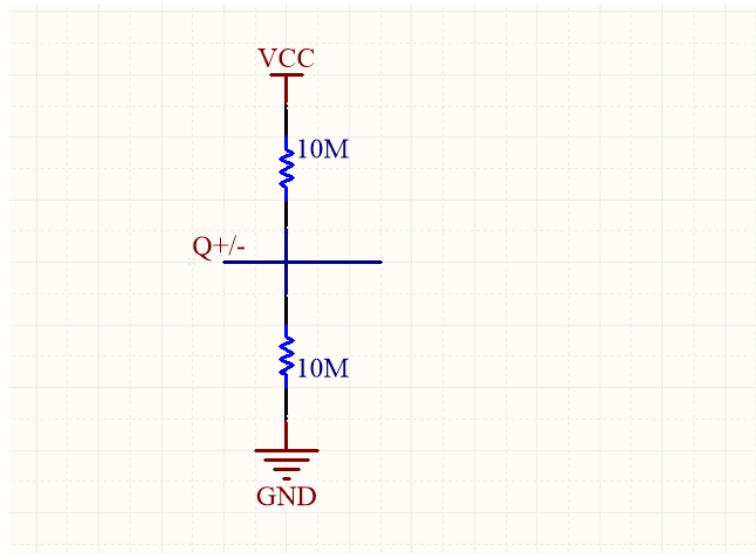
#### 5.1.4 UI 用の分極回路

デフォルト状態(両方のピンがフローティングの状態)では、オフセットにより、Qvar 出力信号が飽和に近いか飽和レベルに到達する場合があります。

このオフセットを制御するにあたり、分極回路を設ける必要があります。下の図のような回路を Qvar 入力に配置することで、Qvar 出力のオフセットが安定します。

抵抗の精度が±1%の場合、得られるオフセットは約±1300 LSB に収まります。

図 12. オフセット安定回路

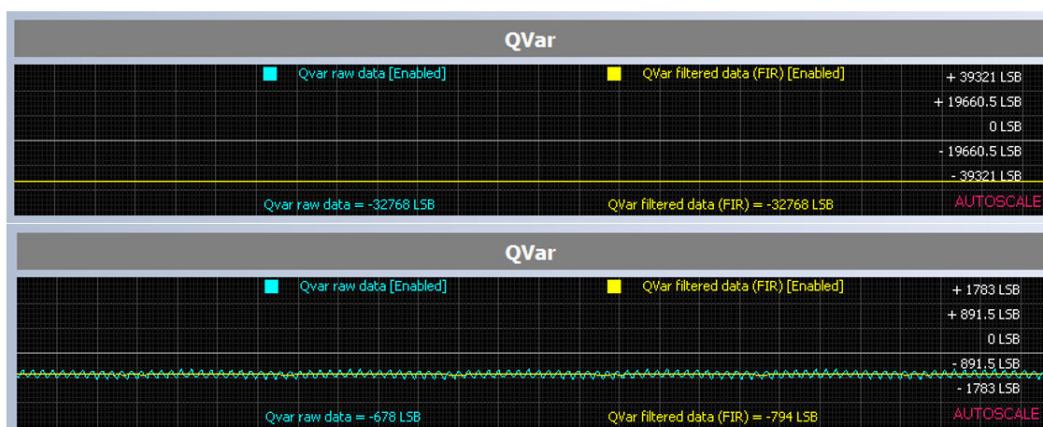


Qvar は  $Q_+$  と  $Q_-$  を入力とする差動回路であり、Qvar 出力はゼロを中心として正負両側に振れます。そのため、GND 電極と  $Q_+$  の組み合わせで一つのボタン、GND 電極と  $Q_-$  の組み合わせでもう一つのボタンを構成し、Qvar 出力が正負どちらに振れるかを観察することでどちらのボタンに触れたかがわかります。

つまり、 $Q_+$  と GND を接触させると信号は正側に飽和し、 $Q_-$  (データシートの QVAR2) と GND を接触させると信号は負側に飽和します。

下図では、オフセット安定化回路なしの場合に、低い方の飽和レベルに非常に近い値を出力していた (-32000 LSB) 状況が、同じ基盤にオフセット安定回路を実装したところ、オフセットが -700 LSB まで低下した例を示しています。

図 13. オフセット安定化回路がない場合(上側のプロット)と、ある場合(下側のプロット)の比較



## 5.1.5

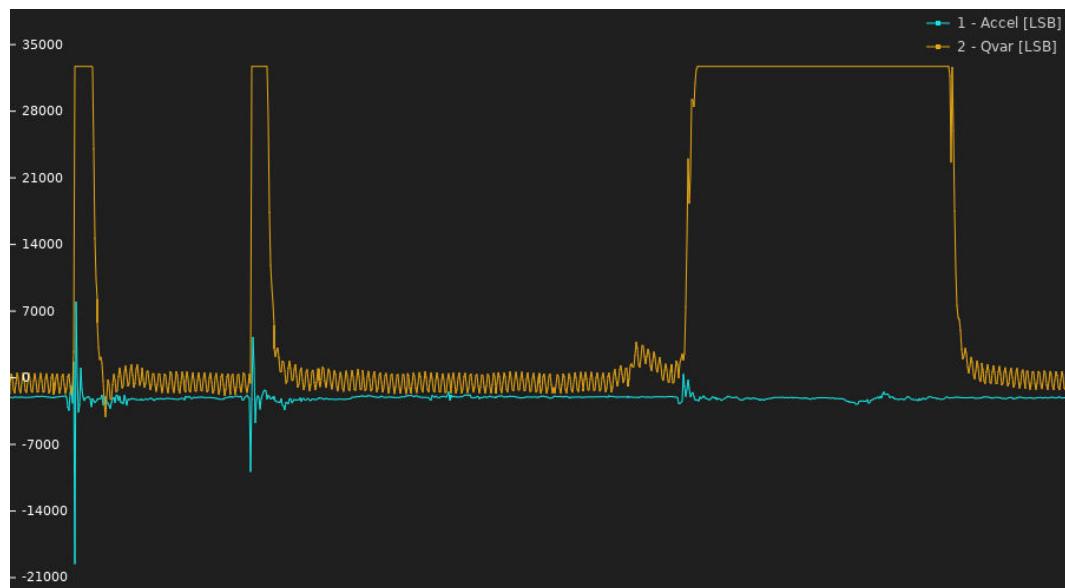
## UI のタッチ・センシングの例

シングル・タップまたはダブル・タップを検出するユーザ・インターフェース・アプリケーションでは、しばしば加速度センサが使用されます。これは、デバイスに触れたときに加わる小さな衝撃を検出できるためです。Qvar を追加することで、ユーザーがデバイスをタップしているのかタッチしているのかを識別でき、さらに加速度センサでは不可能な長押し(長時間タッチ)の識別も可能です。

下の図は、デバイスの電極領域に触れる、ダブル・タップと長押しのシーケンスを示しています。

使用した電極と分極回路は、前のセクションで説明したものです。

図 14. タップと長押しに対する Qvar(黄色)と加速度センサ(水色)の信号波形比較



ダブル・タップ・イベントは加速度センサと Qvar の両方で確認できますが、長押しえイベントに対応する信号を認識することができるるのは Qvar だけです。

Qvar で検出される信号は、電極の設計に大きく依存します。

UI アプリケーションでは、電極(Q+または Q-のどちらでも可)を GND 電極に十分近接して配置し、その両方に同時に触れられるようにする必要があります。

## 5.1.6

## 50Hz 信号処理

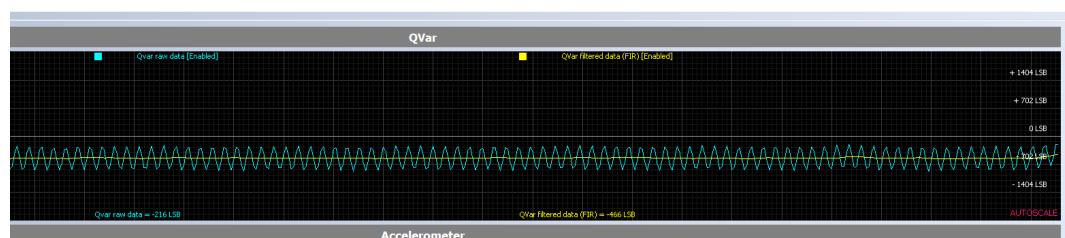
Qvar は電源から発生する 50/60Hz の外部ノイズを検出します。

このノイズはデジタル・バンドパス FIR フィルタによって除去できます。

このフィルタは、アプリケーションに必要な応答時間とノイズ信号の低減レベルを考慮して設計する必要があります。

次の図では、生信号が水色、フィルタリングされた信号が黄色で示されています。

図 15. Qvar の生信号(水色)とフィルタリングされた信号(黄色)



## 5.2 レーダ・アプリケーション用の Qvar

Qvar の電荷センシング機能は、検出するソースとの間に接触がない様々な状況で役に立ちます。

Qvar の動作原理は、すでにこのアプリケーション・ノートの [セクション 1 帯電センシングの原理](#)で詳細に説明しています。このセクションでは、Qvar の電荷センシング機能を使用する、特定のアプリケーション開発の指針となる考え方や注意事項を示します。

社内試験では、レーダ・アプリケーションには単一電極構成が最適であるという結果が得られています。

### 5.2.1 存在検知

前述のとおり、人体は帯電しているため、Qvar 電極の周辺を移動すると電荷の変化が電極によって検出されます。

様々な状況(通り過ぎたのが人なのか動物なのかの判別、または人が移動した方向)を区別することは困難ですが、アプリケーションの機能を正確に定義することにより、プレゼンス検知は実現可能です。

社内試験では、さまざまな電極がさまざまなサイズや形状で試験されています。最終的に、下記のレイアウトの電極で最適の結果が得られました。

図 16. レーダ・アプリケーション用の Qvar 電極



検出される信号には、周辺環境が様々な形で影響を及ぼすことに注意が必要です。

たとえば、屋内と屋外の測定ではノイズ強度に顕著な差が見られます(主に、50/60Hz の商用電源による影響)。

同様の差異は、センサへの電源供給が商用電源から行われるのか、または小さなバッテリにより給電されるのかによっても発生します。

電極が設置される面の材料も、信号レベルに影響を及ぼします。

この電極で収集されたデータの例を下図に示します(50/60Hz ノイズはフィルタ除去済み)。

図 17. Qvar データ収集(4 つの点は歩いている人が通過したことを示します)



- A. 1 人の人間が位置 2 から位置 1 に移動
- B. 1 人の人間が位置 1 から位置 3 に移動
- C. 2 人の人間が位置 3 から位置 2 に移動
- D. 1 人の人間が位置 1 から位置 2 に移動

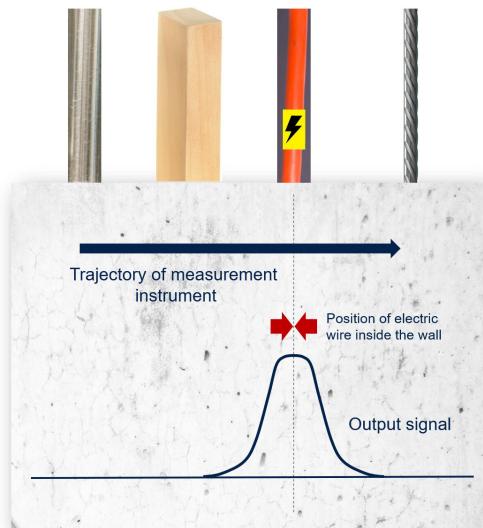
電極の側を 2 人の人間が通過すると信号幅が広くなることがわかります。ただし、1 人の人間がゆっくり歩いて通過した場合と区別することは困難です。

## 5.2.2 ワイヤ検出

50/60Hz のノイズは、さまざまなアプリケーションで問題になる可能性がありますが、電極近傍のワイヤの検出に使用することもできます。

下の図に、その主な考え方を示します。

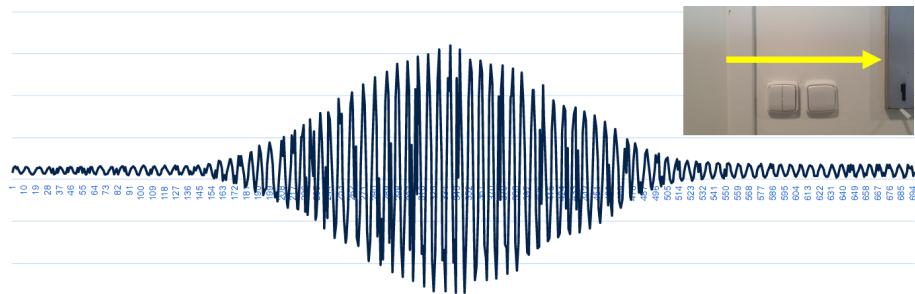
図 18. ワイヤ検出



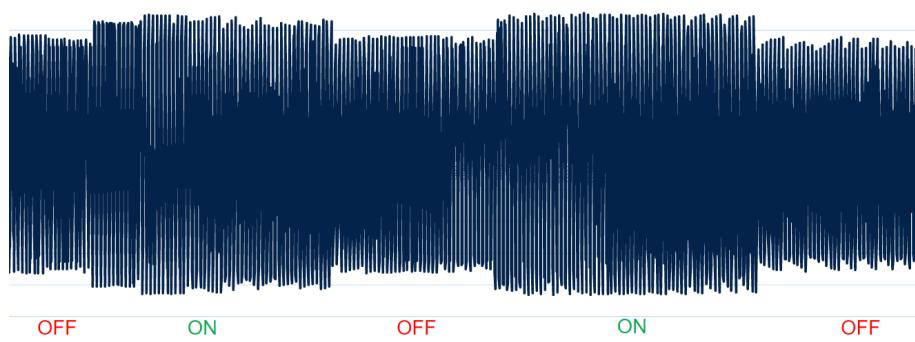
プレゼンス検知アプリケーションで使用したものと同じ電極を壁の近傍で動かすことでワイヤを検出できます。その時点でワイヤが通電していない場合でも検出は可能です。

例として、電灯のスイッチにつながるワイヤが通電している状態でテストした結果を次のプロットに示します。

スイッチの上方を横方向に電極を移動すると、壁の裏側をワイヤが通っている場所で、信号が明らかに大きくなっています。



スイッチがオンかオフかを検知することも可能です。その場合、信号の差異はさほど大きくないため、スイッチがオン/オフどちらの状態にあるかを判断するには、あらかじめ基準となる状態を検出しておく必要があります。



## 5.3 FSM 使用時のレジスタ設定

UI アプリケーションにおける様々なパターンの識別には、マイクロコントローラで実行されるアルゴリズム、またはセンサ内で直接動作するステート・マシン(使用可能な場合)のどちらでも可能です。

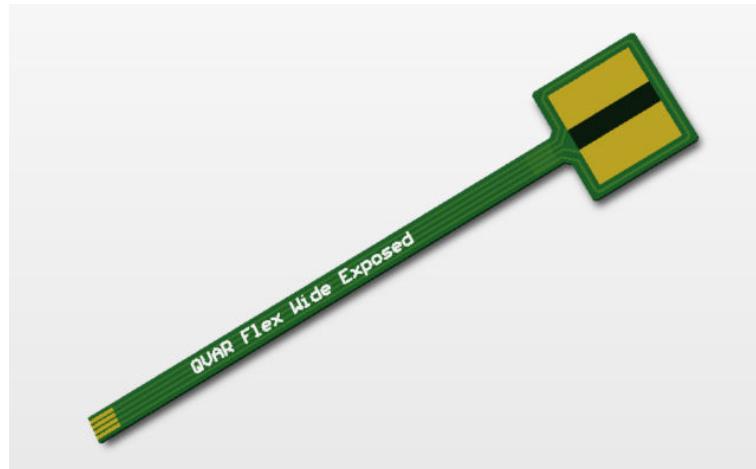
この後のセクションでは、FSM を使用する場合の設定例をいくつか示します。

ステート・マシンの詳細については、該当するデバイスの FSM アプリケーション・ノートを参照してください。

### 5.3.1 イン・イヤー検出

イン・イヤー検出は、デバイスが耳の内部に接触する長押しのジェスチャを考えることができますため、Qvar で検出することができます。

図 19. FSM イン・イヤー検出に使用される電極



使用される電極を図 19 に示します。Q+ピンに接続した電極と GND ピンに接続した電極に人体が触れることで電荷変動が発生し、その変動を Qvar にて検出すると、INT2 割込みを生成するという設定が可能です。

イン・イヤー検出アプリケーションには、図 20 に示す設定で LSM6DSV16X を使用しました。

この設定では、加速度センサの ODR が 30Hz、Qvar の ODR が 240Hz で、消費電流は加速度センサが 195 $\mu$ A、Qvar が 15 $\mu$ A、FSM が 4 $\mu$ A、合計 214 $\mu$ A です。Qvar のデータに適用される閾値は 32000 LSB に設定します。外部センサ(この場合 Qvar)の感度がデフォルト値(0.0015、半精度浮動小数点数(HFP)で 1624h)のままであるため、FSM の THRESH1 の値は 48.000 に設定されます。

以下では、イン・イヤー検出のステート・マシンについて説明します。

図 20. イン・イヤー検出の設定

BYTE #	NAME	7	6	5	4	3	2	1	0
00h	CONFIG A	01 (1 threshold)		11 (3 masks)		00		01 (1 short timer)	
01h	CONFIG B	0	0	0	0	0	0	0	0
02h	SIZE				1Eh (30 bytes)				
03h	SETTINGS	00		0	0	0		00	
04h	RESET POINTER				00h				
05h	PROGRAM POINTER				00h				
06h	THRESH1					5200h (48.000)			
07h									
08h	MASKA				80h (+X)				
09h	TMASKA				00h				
0Ah	MASKB				01h ("In-Ear" output)				
0Bh	TMASKB				00h				
0Ch	MASKC				00h ("Not-in-Ear" output)				
0Dh	TMASKC				00h				
0Eh	TC				00h				
0Fh	TI3				0Ah (10 samples)				
10h	SINMUX				23h				
11h	02h				02h				
12h	SELMA				66h				
13h	SRP				33h				
14h	LNT1   TI3				73h				
15h	SELMB				77h				
16h	OUTC				99h				
17h	SELMA				66h				
18h	SRP				33h				
19h	GNTH1   TI3				53h				
1Ah	CRP				44h				
1Bh	SELMC				88h				
1Ch	CONTREL				22h				
1Dh	STOP				00h				

## 命令セクションの説明

- PP = 10h  
引数 02h で SINMUX コマンドを実行します。サンプルをセットする必要はありません。ステート・マシンの入力として「外部センサ」を選択するために使用されます。CTRL7(16h)レジスタの QVAR\_EN ビットが'1'に設定されているため、Qvar センサが選択されます。この場合、Qvar のデータは、外部センサの+X 軸として使用されます。PP = PP + 2。
- PP = 12h  
SELMA コマンドを実行します。サンプルをセットする必要はありません。MASKA(80h)が選択されます。PP = PP + 1。
- PP = 13h  
SRP コマンドを実行します。サンプルをセットする必要はありません。RESET POINTER が次の状態、14h に設定されます。PP = PP + 1。
- PP = 14h  
LNT1 | TI3 の条件分岐を実行します。サンプルをセットする必要があります。Qvar データが THRESH1 以下の場合は、PP = RP、Qvar データが連続する 10 サンプルで THRESH1 よりも大きい場合は、PP をインクリメントします(PP = PP + 1)。
- PP = 15h  
SELMB コマンドを実行します。サンプルをセットする必要はありません。MASKB(01h)が選択されます。PP = PP + 1。
- PP = 16h  
OUTC コマンドを実行します。サンプルをセットする必要はありません。割込みが生成され、選択されている一時マスク(01h)に応じて OUTS レジスタが更新されます。PP = PP + 1。
- PP = 17h  
SELMA コマンドを実行します。サンプルをセットする必要はありません。MASKA(80h)が選択されます。PP = PP + 1。
- PP = 18h  
SRP コマンドを実行します。サンプルをセットする必要はありません。RESET POINTER が次の状態、19h に設定されます。PP = PP + 1。

- PP = 19h  
GNTH1 | TI3 の条件分岐を実行します。サンプルをセットする必要があります。Qvar データが THRESH1 より大きい場合は、PP = RP、Qvar データが連続する 10 サンプルで THRESH1 以下の場合は、PP をインクリメントします (PP = PP + 1)。
- PP = 1Ah  
CRP コマンドを実行します。サンプルをセットする必要はありません。RESET POINTER がデフォルト値 10h にクリアされます。PP = PP + 1。
- PP = 1Bh  
SELMC コマンドを実行します。サンプルをセットする必要はありません。MASKC(00h)が選択されます。PP = PP + 1。
- PP = 1Ch  
CONTREL コマンドを実行します。サンプルをセットする必要はありません。割込みが生成され、選択されている一時マスク(00h)に応じて OUTS レジスタが更新されます。PP = RP。

FSM の設定は、加速度センサとジャイロセンサの両方をパワーダウン・モードにして実行する必要があります。完全なデバイス設定については、以下のスクリプトを参照してください。

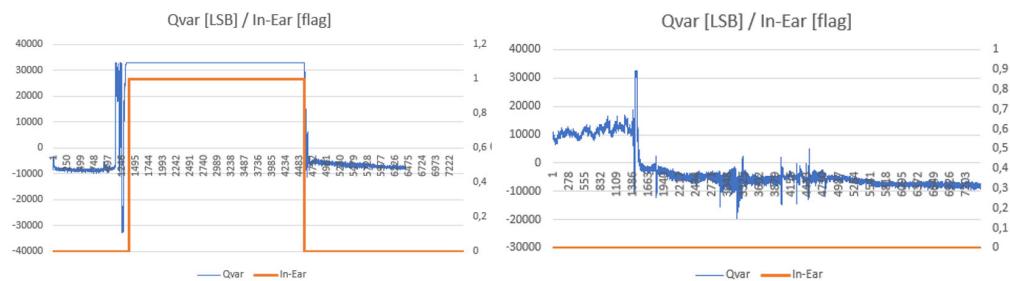
1. Write 00h to register 10h // Set accelerometer sensor in power-down mode
2. Write 00h to register 11h // Set gyroscope sensor in power-down mode
3. Write 80h to register 01h // Enable access to embedded function registers
4. Write 01h to register 05h // EMB\_FUNC\_EN\_B (FSM\_EN) = '1'
5. Write 4Bh to register 5Fh // EMB\_FUNC\_ODR\_CFG\_B (FSM\_ODR) = '01' (26 Hz)
6. Write 01h to register 46h // FSM\_ENABLE = '01h'
7. Write 01h to register 0Fh // FSM\_INT2 = '01h'
8. Write 40h to register 17h // PAGE\_RW: enable write operation
9. Write 11h to register 02h // Enable access to embedded advanced features registers, PAGE\_SEL = 1
10. Write 7Ah to register 08h // PAGE\_ADDRESS = 7Ah
11. Write 00h to register 09h // Write 00h to register FSM\_LONG\_COUNTER\_L
12. Write 00h to register 09h // Write 00h to register FSM\_LONG\_COUNTER\_H
13. Write 01h to register 09h // Write 01h to register FSM\_PROGRAMS
14. Write 01h to register 09h // Dummy write in order to increment the write address
15. Write 00h to register 09h // Write 00h to register FSM\_START\_ADDRESS\_L
16. Write 04h to register 09h // Write 04h to register FSM\_START\_ADDRESS\_H
17. Write 41h to register 02h // PAGE\_SEL = 4
18. Write 00h to register 08h // PAGE\_ADDRESS = 00h
19. Write 71h to register 09h // CONFIG\_A
20. Write 00h to register 09h // CONFIG\_B
21. Write 1Eh to register 09h // SIZE
22. Write 00h to register 09h // SETTINGS
23. Write 10h to register 09h // RESET\_POINTER
24. Write 00h to register 09h // PROGRAM\_POINTER
25. Write 00h to register 09h // THRESH1 LSB
26. Write 52h to register 09h // THRESH1 MSB
27. Write 80h to register 09h // MASKA
28. Write 00h to register 09h // TMASKA
29. Write 01h to register 09h // MASKB
30. Write 00h to register 09h // TMASKB
31. Write 00h to register 09h // MASKC
32. Write 00h to register 09h // TMASKC
33. Write 00h to register 09h // TC
34. Write 0Ah to register 09h // TIMER3
35. Write 23h to register 09h // SINMUX
36. Write 02h to register 09h // 02h
37. Write 66h to register 09h // SELMA

38. Write 33h to register 09h // SRP
39. Write 73h to register 09h // LNTH1 | TI3
40. Write 77h to register 09h // SELMB
41. Write 99h to register 09h // OUTC
42. Write 66h to register 09h // SELMA
43. Write 33h to register 09h // SRP
44. Write 53h to register 09h // GNTH1 | TI3
45. Write 44h to register 09h // CRP
46. Write 88h to register 09h // SELMC
47. Write 22h to register 09h // CONTREL
48. Write 00h to register 09h // STOP
49. Write 01h to register 02h // Disable access to embedded advanced features registers, PAGE\_SEL = 0
50. Write 00h to register 17h // PAGE\_RW: disable write operation
51. Write 00h to register 01h // Disable access to embedded function registers
52. Write 02h to register 5Fh // MD2\_CFG (INT2\_EMB\_FUNC) = '1'
53. Write 74h to register 10h // CTRL1\_XL = '74h' (normal mode, 30 Hz)
54. Write B0h to register 16h // CTRL7 = 'B0h' (Qvar enabled, Zin = 235 MΩ)

次のプロットは、デバイスを耳に装着し、耳から外したときの信号応答(左)と、デバイスを机から持ち上げただけの場合の信号応答(右)の例です。

左の図では、デバイスが耳の中の皮膚に触ると信号が飽和し、FSM は電極が耳から外されるまで 1 を返します。右の図では、デバイスをつかんだ場合、信号は変動するものの飽和には至らないため、FSM 出力は立ち上がりません。

図 21. FSM の信号応答



## 付録 A

### 参考文献

- Yong Yan, Yonghui Hu, Lijuan Wang, Xiangchen Qian, Wenbiao Zhang, Kamel Reda, Jiali Wu, Ge Zheng, "Electrostatic sensors – Their principles and applications", Measurement, Volume 169, February 2021, article 108506
- Chen Xi, Zheng Wei, Cui Zhanzhong and Li Pengfei , "Research on the detection method based on human body quasi-electrostatic field," IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2011, pp. 357-359, doi: 10.1109/ICEMI.2011.6037834

## 改版履歴

表 2. 文書改版履歴

日付	版	変更内容
2022 年 1 月 11 日	1	初版発行
2022 年 2 月 23 日	2	セクション 4.1: ILPS22QS を更新
2022 年 7 月 15 日	3	セクション 1: 静電センシングの原理を更新 セクション 4.2: LSM6DSV16X を更新 セクション 4.3: LSM6DSV16BX」を追加 セクション 5.1: ユーザ・インターフェース・アプリケーション向け Qvar を更新 セクション 5.1.1: タッチ・センシング用の電極を更新 セクション 5.1.2: スワイプ・センシング用の電極、セクション 5.1.3: 水漏れ検出用の電極、セクション 5.2: レーダ・アプリケーション用の Qvar を追加
2022 年 8 月 11 日	4	更新 <a href="#">図 18. ワイヤ検出</a> 文章を微修正

## 目次

1	帯電センシングの原理	2
2	Qvar センシング・チャネルのアーキテクチャ	5
3	電極	6
4	データ・サンプリングのためのレジスタ設定	8
4.1	ILPS22QS	8
4.2	LSM6DSV16X	8
4.3	LSM6DSV16BX	9
5	アプリケーション例	10
5.1	ユーザ・インターフェース・アプリケーション向けの Qvar	10
5.1.1	タッチ・センシング用の電極	10
5.1.2	スワイプ・センシング用の電極	12
5.1.3	水漏れ検出用の電極	13
5.1.4	UI 用の分極回路	14
5.1.5	UI のタッチ・センシングの例	15
5.1.6	50Hz 信号処理	15
5.2	レーダ・アプリケーション用の Qvar	16
5.2.1	存在検知	16
5.2.2	ワイヤ検出	18
5.3	FSM 使用時のレジスタ設定	19
5.3.1	イン・イヤー検出	19
付 錄	A	23
改版履歴		24
表一覧		26
図一覧		27

## 表一覧

表 1.	各種材料の抵抗率 . . . . .	6
表 2.	文書改版履歴 . . . . .	24

## 図一覧

図 1.	立止まっている人と歩いている人.....	2
図 2.	人体モデル.....	3
図 3.	屋内、屋外を歩行したときの Qvar 信号.....	3
図 4.	Qvar センシング・チャネルのアーキテクチャ.....	5
図 5.	Qvar センシング・チャネルのシミュレーション結果.....	6
図 6.	異なる電極構成の場合の 50Hz の外部ノイズ信号.....	7
図 7.	フレキシブル電極の例.....	10
図 8.	タッチ検出用のプリント基板電極の例.....	11
図 9.	スワイプ検出用のプリント基板電極の例.....	12
図 10.	水漏れ検出用の電極の例.....	13
図 11.	水漏れ検出の例.....	13
図 12.	オフセット安定回路.....	14
図 13.	オフセット安定化回路がない場合(上側のプロット)と、ある場合(下側のプロット)の比較.....	14
図 14.	タップと長押しに対する Qvar(黄色)と加速度センサ(水色)の信号波形比較.....	15
図 15.	Qvar の生信号(水色)とフィルタリングされた信号(黄色).....	15
図 16.	レーダ・アプリケーション用の Qvar 電極.....	16
図 17.	Qvar データ収集(4 つの点は歩いている人が通過したことを示します).....	17
図 18.	ワイヤ検出.....	18
図 19.	FSM イン・イヤー検出に使用される電極.....	19
図 20.	イン・イヤー検出の設定.....	20
図 21.	FSM の信号応答.....	22

**重要なお知らせ(よくお読み下さい)**

STMicroelectronics NV およびその子会社(以下、ST)は、ST 製品及び本書の内容をいつでも予告なく変更、修正、改善、改定及び改良する権利を留保します。購入される方は、発注前に ST 製品に関する最新の関連情報を必ず入手してください。ST 製品は、注文請書発行時点で有効な ST の販売条件に従って販売されます。

ST 製品の選択並びに使用については購入される方が全ての責任を負うものとします。購入される方の製品上の操作や設計に関して ST は一切の責任を負いません。明示又は默示を問わず、ST は本書においていかなる知的財産権の実施権も許諾致しません。

本書で説明されている情報とは異なる条件で ST 製品が再販された場合、その製品について ST が与えたいかなる保証も無効となります。

ST および ST ロゴは STMicroelectronics の商標です。ST の登録商標については ST ウェブサイトをご覧ください。[www.st.com/trademarks](http://www.st.com/trademarks) その他の製品またはサービスの名称は、それぞれの所有者に帰属します。

本書の情報は本書の以前のバージョンで提供された全ての情報に優先し、これに代わるものです。

© 2022 STMicroelectronics – All rights reserved