

## 人工知能(AI)の使用を有効化する VL53L7CH および VL53L8CH マルチゾーン Time-of-Flight(ToF)センサ

### はじめに

このユーザ・マニュアルでは、Ultra Light Driver(ULD)API を使用して、VL53L7CH および VL53L8CH Time-of-Flight(ToF)センサを操作する方法を説明しています。デバイスをプログラムするための主な機能、キャリブレーション、および出力結果について説明します。

CNH データは、ST マイクロエレクトロニクスの Time-of-Flight 測距センサを汎用性の高い光学センサへと変貌させ、AI ベースのアプリケーションに対応できるようにしました。出力される CNH のデータからは、通常の測距データ以上の多くのデータを得られることから、新しい用途への可能性を開くことができます。固体(カーペット、木材、ガラス、鏡など)の検出だけでなく、気体や液体(水、油、化学薬品など)の検出もできるようになるため、コーヒー・メーカーや飲料ディスペンサでカップの位置や大きさを検知したり、自走式ロボットなどで床材質の検知を行ったり、形、動き、手の姿勢認識を向上させたりすることが可能になります。

図 1. VL53L7CH および VL53L8CH



### 参考文献

VL53L7CH データシート(DS14309)

VL53L8CH データシート(DS14310)

## 1

## 略記と略語

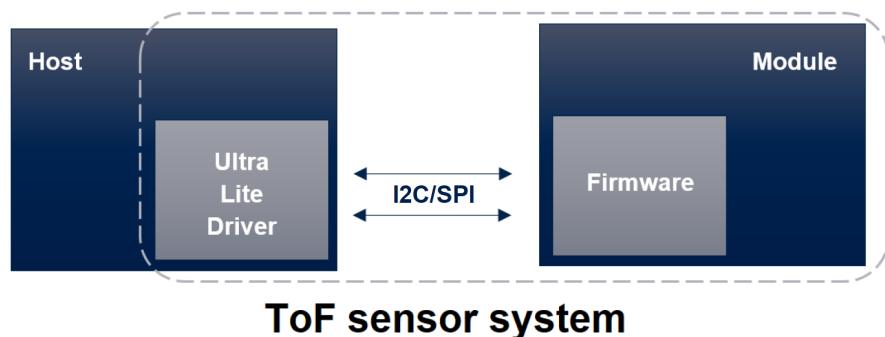
略記/略語	定義
API	Application Program Interface(アプリケーション・プログラム・インターフェース)
CNH	Compact Normalized Histogram(コンパクト・ノーマライズド・ヒストグラム)
DOE	Diffractive Optical Element(回折光学素子)
FOV	Field of View(視野角)
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit(シリアル・バス)
Kcps/SPAD	Kilo-count per second per SPAD(SPAD アレイにおける光子数を定量化するための単位)
RAM	ランダム・アクセス・メモリ
SCL	シリアル・クロック・ライン
SDA	シリアルデータ
SPAD	Single Photon Avalanche Diode(単一光子アバランシェ・ダイオード)
ToF	Time-of-Flight(タイム・オブ・フライト)
ULD	Ultra Light Driver(ウルトラ・ライト・ドライバ)
VCSEL	Vertical-Cavity Surface-Emitting Diode(垂直共振器型面発光レーザ)
Xtalk	Crosstalk(クロストーク)

## 2 機能説明

### 2.1 システム概要

ST マイクロエレクトロニクスの ToF センサを使用したシステムは、ハードウェア・モジュールと、ホスト上で動作させる Ultra Light Driver(VL53LMZ ULD)で構成されています(下図を参照)。ハードウェア・モジュールとは ToF センサのことを示し、ST マイクロエレクトロニクスでは提供しているソフトウェア・ドライバのことを「ドライバ」と呼んでいます。本書では、このホストからセンサにアクセスするためのドライバの機能について説明しており、ドライバによってセンサを制御して、測距データを取得します。

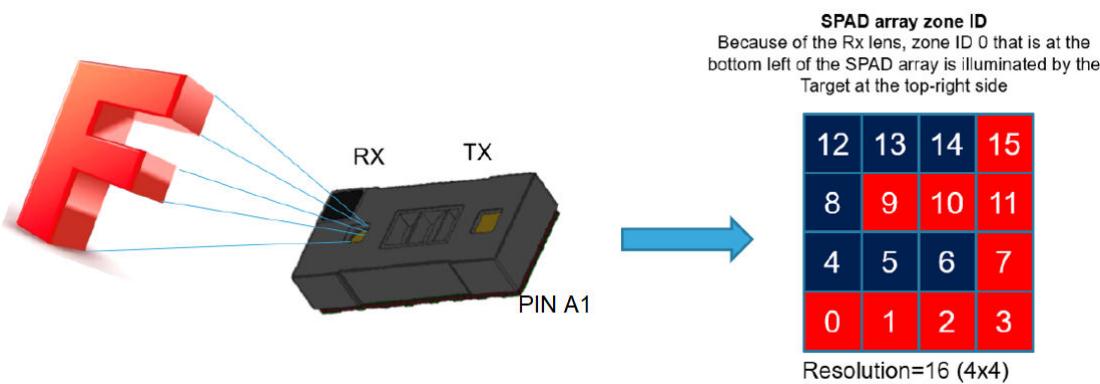
図 2. システム概要



### 2.2 検出方向

センサの Rx 部にはレンズがあり、これによりキャプチャした対象物の画像が(水平方向および垂直方向に)反転します。そのため、撮像した対象物の右上部の箇所は、SPAD の配列の左下にあるゾーン 0 として認識されます。

図 3. 検出の向きについて



## 2.3 I<sup>2</sup>C/SPI 接続と概要

ドライバとファームウェアとの通信は、I<sup>2</sup>Cで行います。最大通信速度は1MHzです。また、VL53L8CHはSPI通信も使用でき、最大通信速度は3MHzです。各通信プロトコルを実装するには、各製品のデータシートに記載されている内容に沿って、ブルアップを行ってください。

センサのデフォルトのI<sup>2</sup>Cアドレスは0x52です。ただし、デフォルトのアドレスを変更することにより、他のデバイスとの衝突を回避したり、複数のToFセンサを接続することでより広範囲の検出ができるようにシステムのFoVを広げたりすることができます。I<sup>2</sup>Cアドレスの変更は、vl53lmz\_set\_i2c\_address()を使用します。SPI接続を用いて複数のセンサを使用する場合には、フォロワ接続となるためNCSピンをセンサごとに独立して接続します。

I<sup>2</sup>Cバス上に複数のToFセンサを接続した場合、他のセンサに影響を与えずにI<sup>2</sup>Cアドレスを変更するには、他のセンサのI<sup>2</sup>C通信を無効にした状態で行うことが重要です。手順は次のとおりです。

1. システムを通常どおりに起動します
2. アドレスを変更しないToFセンサのLPnピンをプル・ダウンします
3. I<sup>2</sup>Cアドレスを変更するデバイスのLPnピンをプルアップします。
4. VL53lmz\_set\_i2c\_address()関数を使用して、I<sup>2</sup>Cアドレスをデバイスにプログラムします。
5. 変更を行わないToFセンサのLPnピンをプル・アップします

これでI<sup>2</sup>Cバス上のすべてのToFセンサが利用可能になります。I<sup>2</sup>Cアドレスの変更が必要なシステム内のすべてのデバイスに対して、上記の手順を繰り返します。

図4. I<sup>2</sup>Cバス上に複数のToFセンサを接続

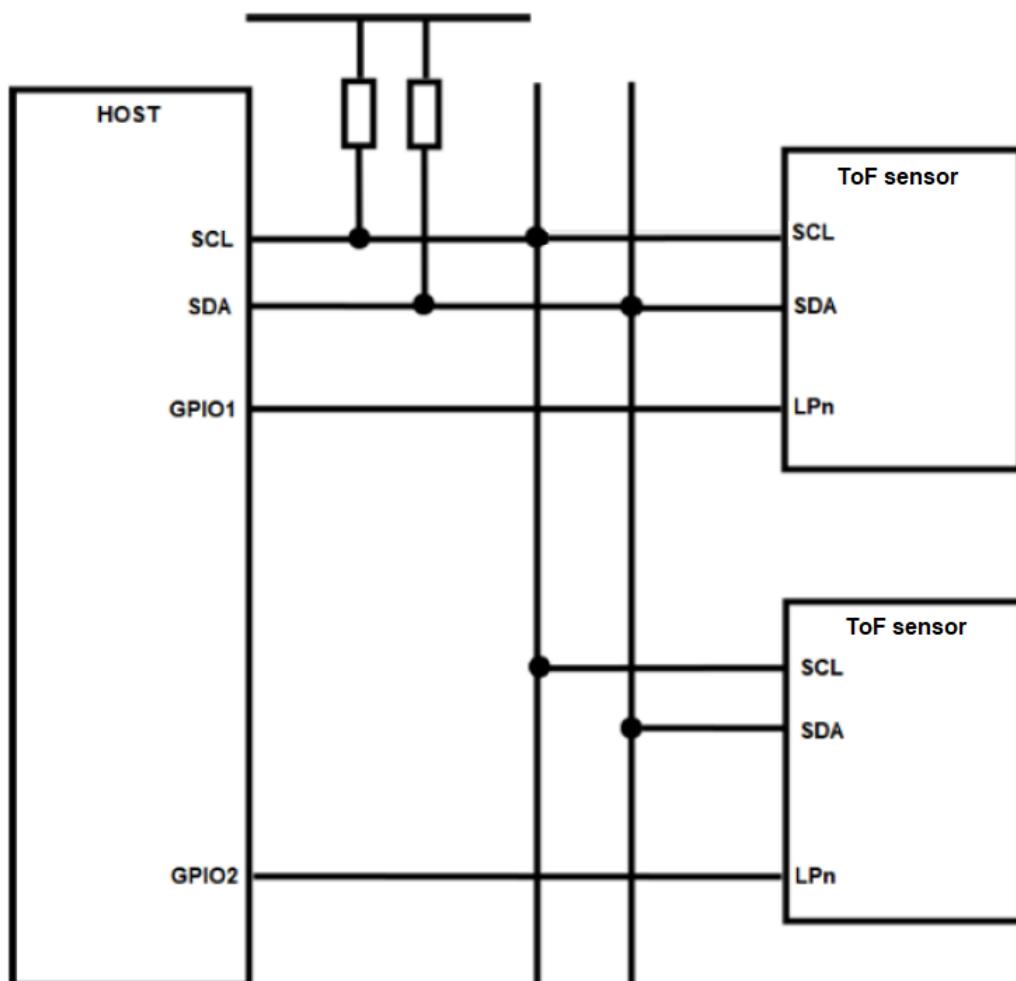
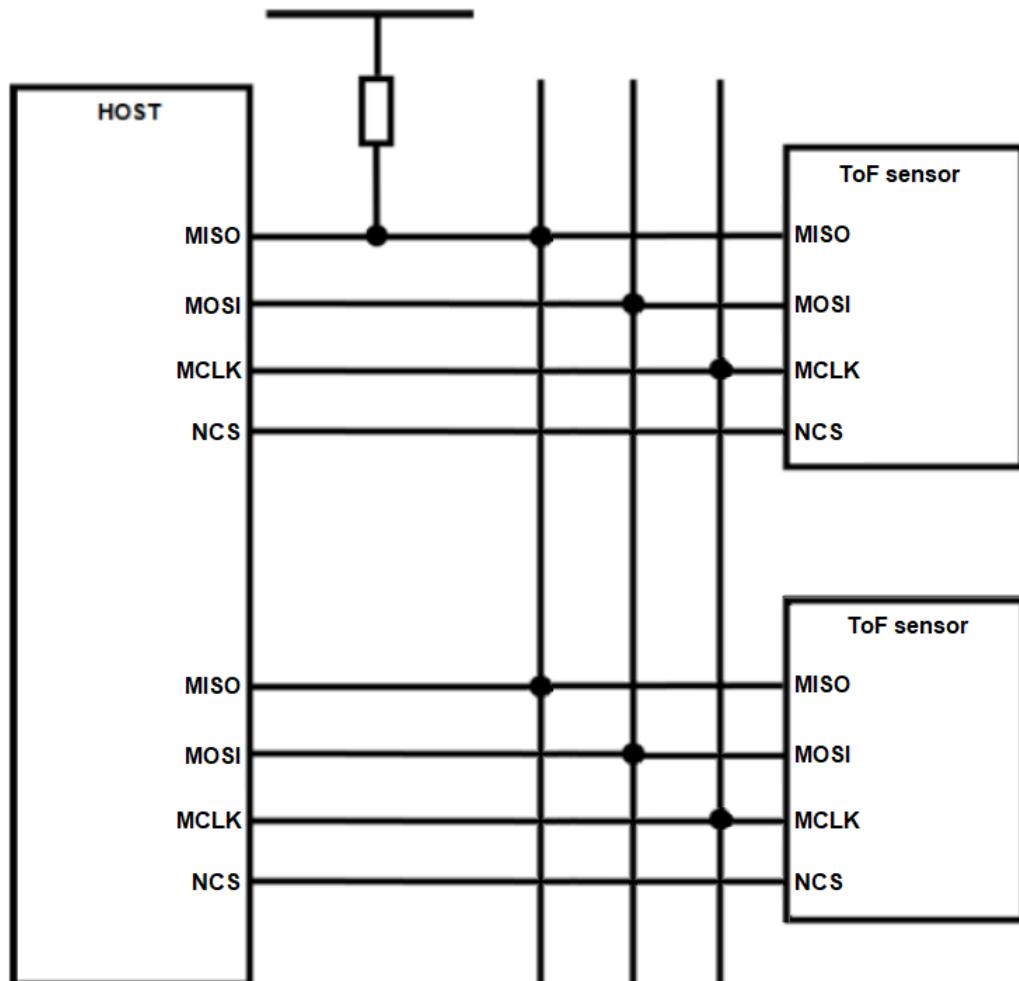


図 5. SPI 上に複数の ToF センサを接続



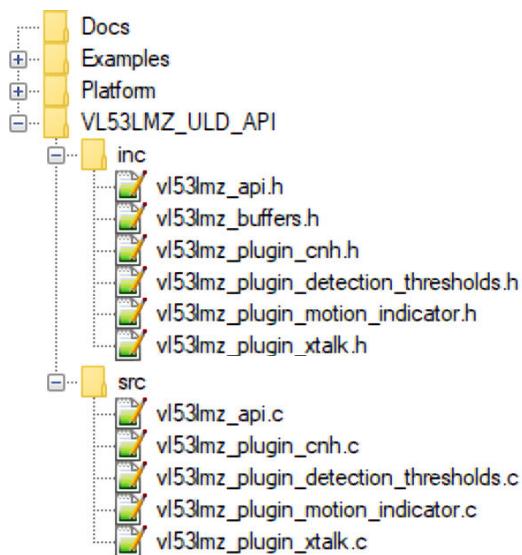
## 3 パッケージの内容とデータ・フロー

### 3.1 ドライバのアーキテクチャとコンテンツ

ドライバ・パッケージは 4 つのフォルダで構成されており、ドライバは VL53LMZ\_ULD\_API のフォルダにあります。

ドライバは必須ファイルとオプション・ファイルで構成されており、オプション・ファイルはプラグインと呼ばれ、ULD 機能を拡張するためのものです。プラグインのファイル名は、「vl53lmz\_plugin」という文字列から始まります（例：vl53lmz\_plugin\_xtalk.h）。プラグインを使用しなくても、他のドライバの機能に影響を及ぼすことはありません。下図に、必須ファイルとオプションであるプラグイン・ファイルを示します。

図 6. ドライバ・アーキテクチャ



ユーザは、/Platform フォルダにある 2 つのファイルを実装する必要があります。このプラットフォームにあるファイルは空のシェルで、専用の関数を書き込む必要があります。

注 Platform.h ファイルには、ULD を使用するために必要なマクロが記述されており、ULD を正しく使用するには、ファイルのすべての内容が必須となります。

### 3.2

### キャリブレーション(補正)について

クロストーク(Xtalk)とは SPAD が受光する光の 1 つで、センサ上に設置された保護ウインドウ(カバー・ガラス)との間で発生する VCSEL の反射光のことを示します。Time-of-Flight センサは自己で補正を行っているため、追加の補正は不要です。

センサがカバー・ガラスによって保護されている場合、クロストーク・キャリブレーションが必要となる場合があります。基本的にはヒストグラム・アルゴリズムにより、60cm を超える測定の場合には測距の結果はクロストークの影響を受けません。ただし、60cm 未満の場合には、返ってくる信号よりもクロストークが大きくなる可能性があり、この場合、対象物までの距離が誤って計算されたり、実際よりも近くに見えたりします。クロストーク・キャリブレーション機能はすべて、クロストーク・プラグイン(オプション)に内蔵されており、「vl53lmz\_plugin\_xtalk」を使用します。

クロストーク・キャリブレーションを実行し、補正值のデータを保存して利用しますが、使用するターゲットは反射率が既知のものを使い、距離を固定して設置します。最小設置距離は 600mm で、ターゲット・サイズは FoV 全体をカバーしている必要があります。環境に応じて、次の表に示すように、クロストーク・キャリブレーションの実施条件を調整することができます。

表 1. キャリブレーションの条件

設定	最小値	ST マイクロエレクトロニクスの推奨値	最大値
距離[mm]	600	600	3000
サンプル数	1	4	16
反射率[%]	1	3	99

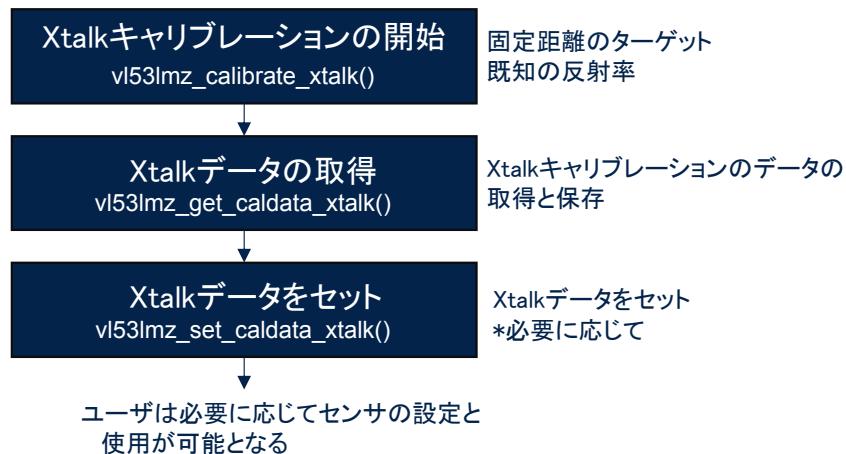
#### 注

サンプル数を増やすと精度が上がりますが、キャリブレーションに掛かる時間が長くなります。時間とサンプル数の関係は線形で、おおよその時間は以下の通りです。

- 1 サンプル ≈ 1 秒
- 4 サンプル ≈ 2.5 秒
- 16 サンプル ≈ 8.5 秒

キャリブレーションは、vl53lmz\_calibrate\_xtalk()を使用して実行します。この関数はいつでも使用できますが、センサは最初に初期化している必要があります。下図に、クロストーク・キャリブレーションの流れを示します。

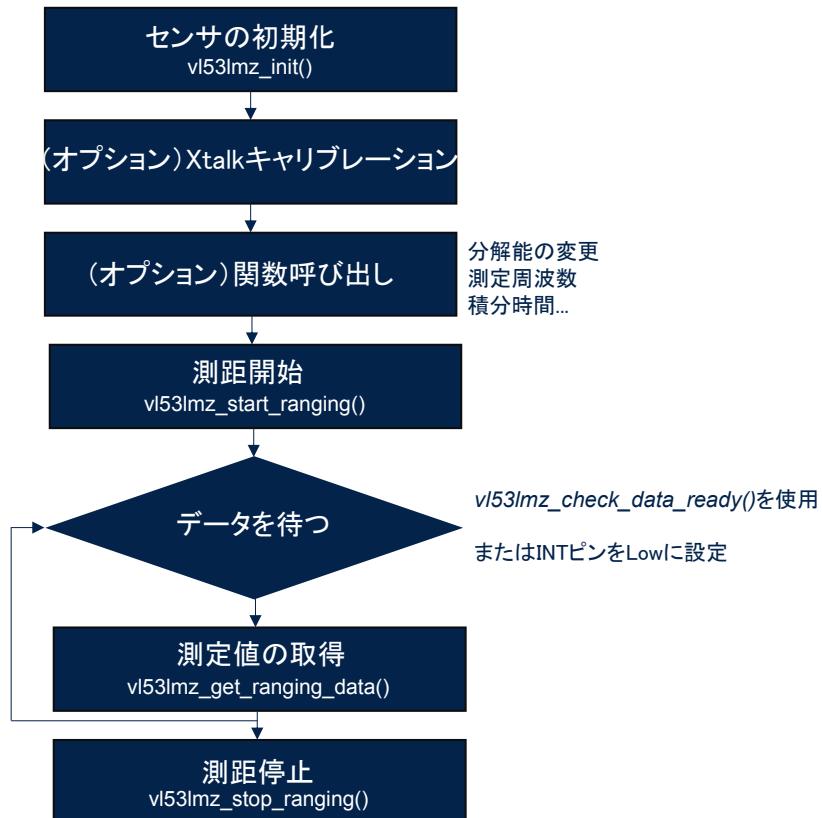
図 7. Xtalk キャリブレーション



### 3.3 測距の流れ

下図に、測定値を取得するまでのフローを示します。クロストーク・キャリブレーションとオプション関数の呼出しは、測距を行う前に実行する必要があります。関数 get/set は測距中は使用できない仕様となっています。

図 8. 一般的な測距の流れ



## 4 搭載機能

センサ・ドライバはいくつかの機能を搭載しており、ユーザは使用用途に応じて各機能を使用します。ドライバで使用できるすべての機能について以下のセクションで説明します。

### 4.1 初期化

Time-of-Flight センサを使用する前に、センサを初期化する必要があります。初期化を実行するためには、以下の作業が必要です。

1. センサに電源を入れます
  - VL53L7CH の場合: VDDIO、AVDD、LPn ピンを High に設定します
  - VL53L8CH の場合: VDDIO、AVDD、CORE\_1V8 ピンを High に設定します
2. `vl53lmz_init()`を呼び出します。この関数により、モジュールにファームウェア(～84KB)がコピーされます。I<sup>2</sup>C または SPI を介してコードがロードされ、初期化を完了するための起動ルーチンが実行されます。

### 4.2 センサのリセット方法

センサをリセットするには、以下のピンを切り替える必要があります。

1. VDDIO および AVDD ピン(VL53L8CH の場合は CORE\_1V8 も)を Low に設定します。
2. 10 ms 待ちます。
3. VDDIO および AVDD ピン(VL53L8CH の場合は CORE\_1V8 も)を High に設定します。

注 VL53L7CH の場合は I<sup>2</sup>C\_RST ピンを、VL53L8CH の場合は SPI\_I2C\_N ピンをトグルで切り替えて I<sup>2</sup>C 通信をリセットします。

### 4.3 Resolution(分解能)

分解能とは、利用可能なゾーンの数を示します。VL53L7CH および VL53L8CH センサでは、2 つの分解能 4x4(16 ゾーン)と 8x8(64 ゾーン)がサポートされており、デフォルトの設定は、4x4 です。

`vl53lmz_set_resolution()`を使用して、分解能を変更します。測定周波数は分解能の設定に影響を受けるため、この関数を設定してから測定周波数の設定を変更する必要があります。また、分解能を変更すると、結果を読み出す際に I<sup>2</sup>C/SPI バスのトラフィック量も変化します。

### 4.4 Ranging frequency(測定周波数)

測定周波数を変更することができます。最大周波数は分解能によって異なるため、使用する分解能(4x4 または 8x8)を選択してからこの関数を設定する必要があります。以下の表に、最小周波数と最大周波数を示します。

表 2. 最小周波数と最大周波数

分解能	最小周波数[Hz]	最大周波数[Hz]
4x4	1 <a href="#">(1)</a>	60
8x8	1	15

1. VL53L8CH のみ: Continuous mode(連続測距モード)では、フレームレートが低すぎると信号量が非常に多くなり近距離での測定精度が低下する可能性があります。測定精度を最大限維持するために、5cm 未満の距離で測定を行う場合は 5Hz 未満とならないように設定してください。

測定周波数の変更は、`vl53lmz_set_ranging_frequency_hz()`を使用します。デフォルトの測定周波数は 1Hz に設定されています。

## 4.5

## Ranging mode(測距モード)

測距モードは以下の 2 つをサポートしており、ハイ・パフォーマンスでの測距または低消費電力での測距を実現することができます。

- Continuous mode(連続測距モード) : ユーザが定義した測定周期により、連続して測定データを取得します。常に VCSEL が有効となった状態で測距が行われるため、最大測定距離と周辺光への耐性が向上します。このモードは、高速測定やハイ・パフォーマンスが必要な場合にお勧めです。
- Autonomous mode(自律型測距モード) : デフォルトのモード。ユーザが定義した測定周期により、連続して測定データを取得します。VCSEL が有効になるのは、ユーザが `vl53lmz_set_integration_time_ms()` で定義した期間のみで VCSEL は常に有効な状態ではないため、消費電力を削減できます。測定周期を長くすることさらに消費電力を抑えることができることから、このモードは低消費電力アプリケーションにお勧めです。

測距モードの変更は、`vl53lmz_set_ranging_mode()` を使用して行います。

## 4.6

## Integration time(積分時間)

積分時間の設定は、Autonomous mode(自律型測距モード)でのみ利用できる機能です(セクション 4.5: Ranging mode(測距モード)を参照)。この機能を使用して VCSEL が有効な時間の長さを変更できます。測距モードが Continuous mode(連続測距モード)に設定されている場合、積分時間を変更しても効果はありません。積分時間のデフォルト値は 5 ms です。

積分時間の仕様は分解能によって異なり、4x4 では 1 つの積分時間、8x8 では 4 つの積分時間で構成されます。下図に、両分解能における積分時間の仕様について図示します。

図 9. 4x4 の積分時間

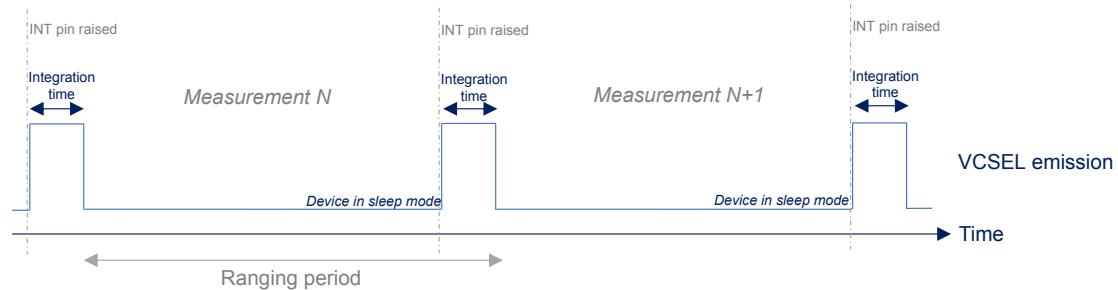
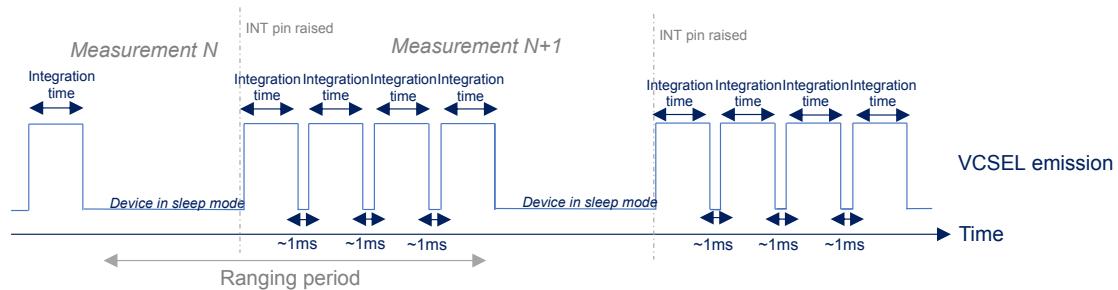


図 10. 8x8 の積分時間



すべての積分時間の合計と 1ms のオーバーヘッドは、測定周期よりも短く設定する必要があります。そうしなければ、設定された積分時間に合わせて測距周期が自動的に長くなります。

## 注

高感度の SPAD により様々な光を検出するため、屋内使用時でも誤検出する可能性があります。そのため、タイミング・パケットが 100ms を超える場合には、誤検出を回避するため、最も強い信号が検出された対象物を検出するモード (strongest target) を使用することをお勧めします。詳細は、セクション 4.9: Target order(測定優先順位)を参照してください。

## 4.7 動作モード

デバイスを使用しない場合など、適切な動作モードを選択することで電力消費を抑えることができます。Time-of-Flight センサは、次のいずれかの電力モードで動作します。

- Wake-up(ウェイクアップ) : センサは HP(High Power・高出力)状態となり、ホスト・デバイスからの指示を待ちます。
- Sleep(スリープ) : センサは LP(Low Power・低出力)状態となり、ウェイクアップ・モードに設定されるまで使用することはできません。このモードでは、ファームウェアの設定内容は保持されています。
- Deep sleep(ディープ・スリープ) : センサは超低出力状態となり、センサの電流消費量は数マイクロアンペアとなります。ファームウェアの設定内容やキャリブレーション・データが完全に失われるため、センサを使用するにはセンサをウェイクアップ・モードにし、ファームウェアの各機能の項目を再度設定する必要があります。

動作モードの変更は `vl53lmz_set_power_mode()` を使用して行います。デフォルトのモードはウェイクアップです。

### 注

動作モードの変更はデバイスが測距状態ではないときに行ってください。

## 4.8 Sharpener(シャープナー)

測定対象物から返ってきた信号は、鋭いエッジを持った明瞭なパルスではありません。エッジがぼやけ、隣接するゾーンの距離データに影響を及ぼすこともあります。シャープナー機能を使用することで、ベーリング・グレアと呼ばれる信号を鈍らせる現象によって生じた信号の一部または全部を除去することができます。

下図に示す例では、FoV の中心部の 100mm 付近に物体があり、その背後の 500mm の場所に別の物体があります。シャープナーの設定値によっては、近くにある物体が実際よりも多くのゾーンに表示されることがあります。

図 11. シャープナーの設定値による出力データの例

Real scene :

500	500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	100	100	100	100	500	500	500
500	500	100	100	100	100	500	500	500
500	500	100	100	100	100	500	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500	500

0% Sharpener :

100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100

20% Sharpener :

500	500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	100	100	100	100	500	500	500
500	500	100	100	100	100	500	500	500
500	500	100	100	100	100	500	500	500
500	500	100	100	100	100	500	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500	500

40% Sharpener :

500	500	500	500	500	500	500	500	500
500	100	100	100	100	100	500	500	500
500	100	100	100	100	100	500	500	500
500	100	100	100	100	100	500	500	500
500	100	100	100	100	100	500	500	500
500	100	100	100	100	100	500	500	500
500	100	100	100	100	100	500	500	500
500	100	100	100	100	100	500	500	500
500	100	100	100	100	100	500	500	500

99% Sharpener :

100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100

シャープナーは、`vl53lmz_set_sharpener_percent()` を使用して変更します。設定できる値は 0%~99% で、デフォルト値は 5% です。

#### 4.9

#### Target order(測定優先順位)

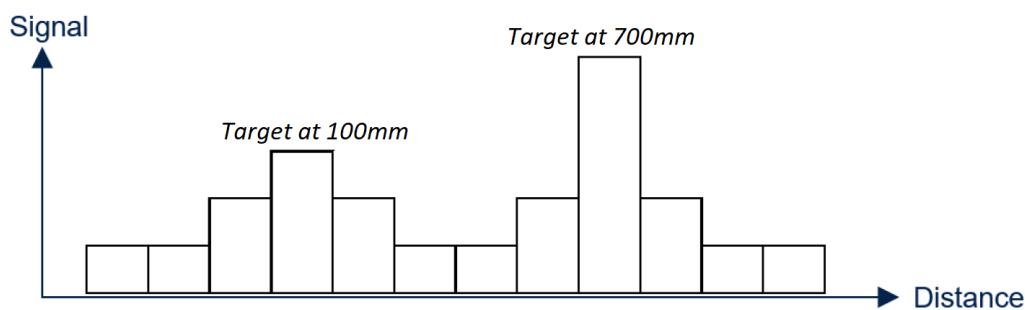
本センサでは、ヒストグラム処理の利点である複数対象物の椰出を各ゾーンで行えるだけでなく、レポートされる対象物の順序を選択することもできます。それが Target order(測定優先順位)と呼ばれる機能で、2つのオプションがあります。

- Closest(クローゼスト) : 最も近い物体が最初の測定対象物としてレポートされます
- Strongest(ストロングエスト) : 最も強い信号を返した物体が最初の測定対象物としてレポートされます

測定時の優先順位の変更は、`vl53lmz_set_target_order()`を使用し、デフォルトは「Strongest」となっています。

下図の例は、2つの物体が椰出された様子を示しています。1つは距離が 100mm で反射率の低いもの、もう1つは距離が 700mm で反射率の高いものです。

図 12. 2つの物体を椰出しているヒストグラム・データの例



#### 4.10

#### Multiple targets per zone(ゾーンごとの複数物体椰出)

センサは、ゾーンごとに最大 4 つの対象物を測定できますが、センサから出力される対象物の数は、ユーザが設定できます。

注

同じゾーン内で複数の物体を椰出するには、物体間の距離は最小で 600mm 必要です。

設定はドライバからはできず、「platform.h」ファイル内で選択する必要があります。`VL53LMZ_NB_TARGET_PER_ZONE` の値を 1~4 のいずれかで設定してください。[セクション 4.9: Target order\(測定優先順位\)](#)で説明した Target order(測定物の優先順位)の機能は、椰出する対象物の順序に直接影響します。デフォルトでは、センサはゾーンごとに最大 1 つの物体を出力します。

注

ゾーンごとの椰出数を増やすと、ドライバに必要な RAM サイズも増加します。

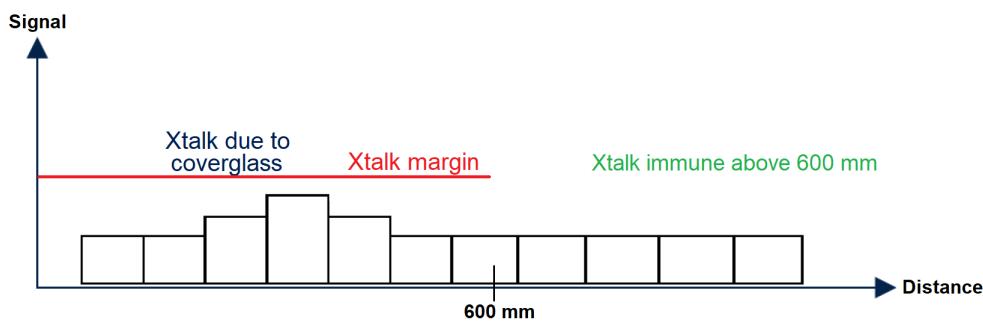
#### 4.11

#### Xtalk マージン

Xtalk マージンは、オプション機能であるプラグイン Xtalk(`vl53lmz_plugin_xtalk`)の使用時にのみ利用できる機能で、`vl53lmz_plugin_xtalk` の.c ファイルと.h ファイルを使用する必要があります。

センサ上部にカバー・ガラスが設置されている場合、この機能を使用して椰出の閾値を変更することができます。閾値を大きくすることで、Xtalk キャリブレーション・データの設定後に、カバー・ガラスが椰出されないようにできます。たとえば、クロストーク・キャリブレーションを1つのデバイスで実行し、同じキャリブレーション・データ(補正值)を他のすべてのデバイスで再利用することができます。このときに使用するのが Xtalk マージン機能で、クロストーク・キャリブレーションの補正值を調整するために使用します。下図に、Xtalk マージンについて示します。

図 13. Xtalk マージン



## 4.12 Detection thresholds(閾値検出)

通常の測距に加えて、定義した基準に従って対象物を検出するようにプログラムすることもできます。この機能は、API にデフォルトで含まれていないオプションの機能で、plugin の「vl53lmz\_plugin\_detection\_thresholds」というファイルを使用する必要があります。

この機能を使用すると、ユーザが定義した条件が満たされた場合に INT ピンへの割込みをトリガすることができます。次の 3 種類の設定が可能です。

- 分解能 4x4: ゾーンごとに 1 つの閾値を設定(合計 16 個の閾値)
- 分解能 4x4: ゾーンごとに 2 つの閾値を設定(合計 32 個の閾値)
- 分解能 8x8: ゾーンごとに 1 つの閾値を設定(合計 64 個の閾値)

使用する設定に関係なく、閾値の設定手順と RAM サイズは同じです。閾値の組合せごとに、いくつかのパラメータを設定する必要があります。

- Zone id: 選択したゾーンの ID(セクション 2.2: 検出方向を参照)
- Measurement: 測定値(距離、信号、SPAD 数など)
- Type: 検出閾値の設定(閾値の内、閾値の外、閾値未満など)
- Low threshold: 低閾値。ユーザが検出アルゴリズムを用意する必要はなく、API が自動で処理します。
- High threshold: 高閾値。ユーザが検出アルゴリズムを用意する必要はなく、API が自動で処理します。
- Mathematic operation: 4x4 でのみ使用可能 – ゾーンごとに 2 つの閾値を組合せる。1 つのゾーン内で閾値を組合せて設定することができます。

## 4.13 Interrupt autostop(自動割込み停止機能)

測距実行中に測定を中断したい場合には、自動割込み停止機能を使用します。通常センサは測定フレームが終了するまで測距を実行し続ける仕様となっているため、測定中にセンサを停止することはできません。しかしながら、この自動停止機能を使用することで、割込みのトリガによって測定フレームの途中であっても測距を中断させることができます。

自動停止機能は、detection threshold(閾値検出)機能と組み合わせることでより効果的となります。例えば対象物を検出した時に実行中の測定を自動的に中断させるという使用方法があり、顧客のシステムによっては、自動停止機能を使用してすばやく他のセンサ切り替えるなどの使い方もできます。

自動割込み停止機能は、vl53lmz\_set\_detection\_threshold\_auto\_stop()を使用して有効化できます。測定の中断後は、vl53lmz\_stop\_ranging()を使用して測距を停止することをお勧めします。

## 4.14 Motion indicator(モーション・インジケータ)

VL53L7CH および VL53L8CH センサには、測定場面において動きを検出できる機能が搭載されています。モーション・インジケータは、連続するフレーム間のデータを使用しており、この機能を利用するにはプラグインの「vl53lmz\_plugin\_motion\_indicator」が必要です。

モーション・インジケータの初期化は、vl53lmz\_motion\_indicator\_init()を使用し、センサの分解能を変更する場合には、専用の関数 vl53lmz\_motion\_indicator\_set\_resolution()を使用します。

動きを検出するための最小距離と最大距離を変更することもでき、最小距離と最大距離の差は、1500mm を超えないようになります。デフォルトは、最小距離は 400mm、最大距離は 1500mm で設定されています。

結果は「motion\_indicator」に格納され、「motion」でゾーンごとの動きの強度を確認できます。値が大きい場合はフレーム間で動きの変化が激しいことを示しており、通常の動きの値は 100~500 となります。動きを検出する感度は、積分時間、対象物までの距離、対象物の反射率によって左右されます。

例えば、低消費電力が要求されるアプリケーションにおいて、モーション・インジケータと自律型測距モードを組み合わせて動きに対して検出閾値を設定して使用することで、理想的なシステムを実現できると考えています。FoV 内の動きの変化を検出するモーション・インジケータ機能を使用することでより低い消費電力を実現することが可能になります。

## 4.15 外部同期ピン(VL53L8CH のみ)

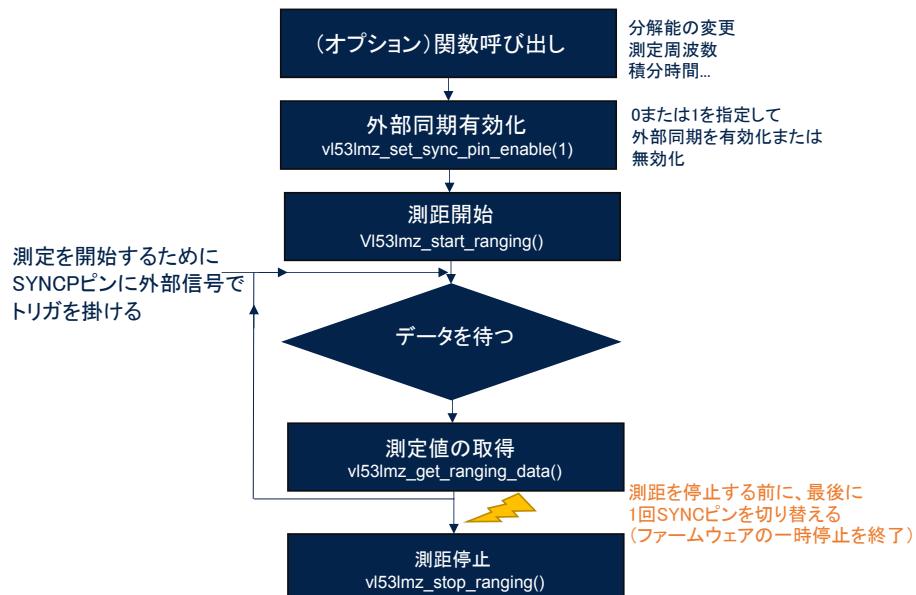
外部からのトリガ信号を用いることにより、VL53L8CH と同期して使用することができます。外部同期機能を使用した場合、VL53L8CH は次の測距を開始するために、SYNC ピンでの割込みを待ちます。この機能を使用するには、SYNC ピン(B1)を接続する必要があります、詳細は本製品のデータシートをご参考ください。

外部同期機能を使用するにあたって、特別な条件はありません。ただし、VL53L8CH の測定周波数は外部信号の周波数より高い必要があります。

外部同期機能は、`vl53lmz_set_external_sync_pin_enable()`を使用して有効または無効を設定します。測距は通常どおり `vl53lmz_start_ranging()`を使用して開始し、センサを停止したい場合には SYNC ピンをトグルで切り替えて使用することをお勧めします。

外部同期機能を使用する際の基本的な流れを以下に示します。

図 14. 外部同期機能使用時の測距の流れ



## 5 コンパクト・ノーマライズド・ヒストグラム(CNH)について

### 5.1 はじめに

このセクションでは、VL53L7CH および VL53L8CH センサで出力可能なコンパクト・ノーマライズド・ヒストグラム(CNH)データについて説明します。

この名称はデータに関する以下の機能に由来しています。

- Compact(コンパクト) : 元のヒストグラム・データに比べてデータ量が低減されている
- Normalized(ノーマライズド=正規化) : 生データがフレーム間の調整によって生じたばらつきを補正するために調整されている
- Histogram(ヒストグラム) : 測定対象物から返ってきた信号の強度と範囲を記録しているデータの形式。ヒストグラム形式。

CNH データ用のオプション設定によりデバイスからホストに送信されるデータの総量を最小限に抑えることができ、これによりアプリケーションごとに最適なフレームレートを得ることができます。

### 5.2 CNH 設定

データ・サイズを最適化するための CNH 設定は、次の 2 つの方法があります。

1. Zone aggregation(ゾーン・アグリゲーション) : オプションの機能で、設定した分解能のゾーンを結合させることで全体のデータ数を減らすことができます。
2. ヒストグラム設定 : 以下の方法により、ヒストグラム・データのサイズを低減します。
  - a. 必要な bin・データの範囲を定義
  - b. bin・データをビニングして、(対象物の範囲に関して)低い分解能のヒストグラムを生成

### 5.3 Zone aggregation(ゾーン・アグリゲーション)

ゾーンを結合できる本機能では、複数の検出ゾーンを組み合わせることで 1 つの CNH データに集約させることが可能です。この機能を使用して、センサによって生成されるデータの空間分解能を低減できると考えており、高いフレームレートが求められながらも分解能の低いデータが許容される場合において有用です。

この機能は行列を使用して設定しますが、この行列は測距を開始する前にセンサにダウンロードされます。データ構造の名称は AggregateMap(アグリゲート・マップ)です。このデータ構造にはデバイスが使用する分解能と同じ数のデータ要素が含まれており、16 または 64 となっています。アグリゲート・マップでは、各ゾーンから CNH 集合体へのマッピングを定義しますが、マップ内の各エントリはどの CNH にゾーン・データを集約、結合させるかを定義します。マップ内の各エントリには、ゾーン・データをマッピングするための aggregate ID(アグリゲート番号)を設定するか、ゾーンをアグリゲーションにマッピングしない場合には数字「-1」を設定します。各ゾーンは 1 つのアグリゲーションにのみマッピングできますが、アグリゲーションは複数のゾーンからデータを受信できます。

アグリゲート・マップで使用されるアグリゲート ID は、0 から始まる連続の範囲とする必要があります。生成される CNH アグリゲートの総数は、アグリゲート・マップへの最大エントリによって定義されます。

複数ゾーンからのデータを組み合わせるには、指定された CNH アグリゲートにデータを集計します。

アグリゲート・マップの作成を容易にするために、「vl53lmz\_plugin\_cnh module」には vl53lmz\_cnh\_create\_agg\_map() が用意されています。

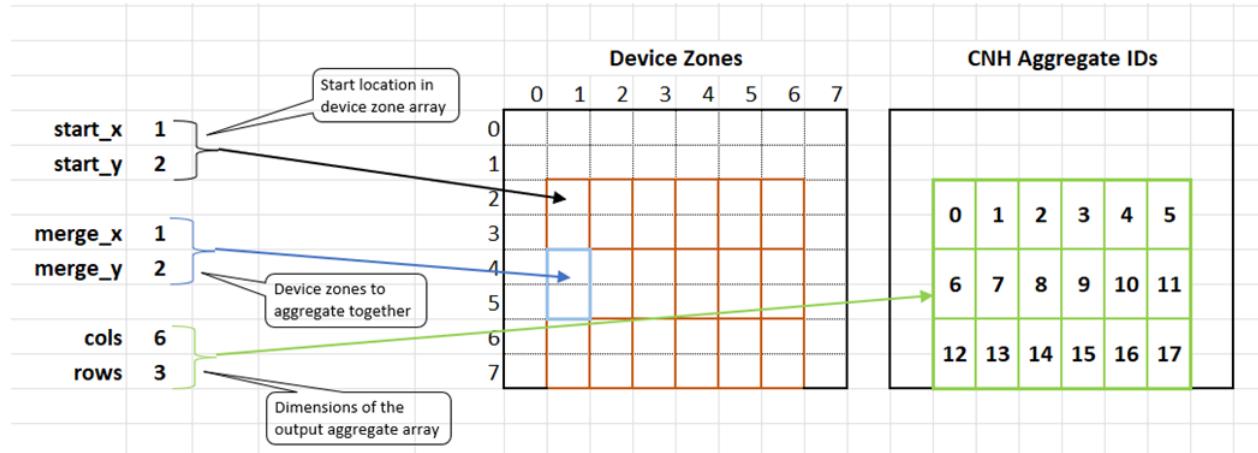
```
uint8_t vl53lmz_cnh_create_agg_map(VL53LMZ_Motion_Configuration      *p_mi_config,
                                      int16_t resolution,
                                      int16_t start_x,
                                      int16_t start_y,
                                      int16_t merge_x,
                                      int16_t merge_y,
                                      int16_t cols,
                                      int16_t rows );
```

パラメータは次のとおりです。

- start\_x, start\_y: CNH データ出力における最初のゾーンの X 座標と Y 座標を定義します
- merge\_x, merge\_y: 1 つのアグリゲートにいくつのゾーンをマージするかを定義します。たとえば、merge\_x = 2、merge\_y = 1 とした場合、2x1 のゾーンが 1 つのアグリゲートにマージされます。
- cols, rows: アグリゲート・データの行と列、それぞれの数を定義します

アグリゲート・マップの設定は、 $4 \times 4$  または  $8 \times 8$  の元のセンサのゾーンから、アグリゲート・ゾーンの配列である cnhCols x cnhRows へとマッピングを定義します。下図は、パラメータの使用例です。

図 15. ゾーン・アグリゲーションの例



## 5.4 ヒストグラム設定

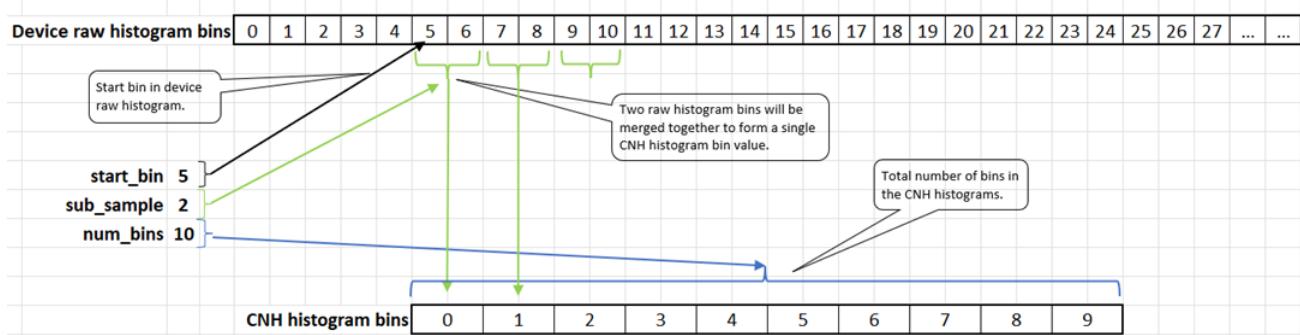
ホスト・デバイスに送信するヒストグラム・データを調整するための設定ができます。設定した内容は取得したヒストグラム・データ全体に適用されます。但し、取得したデータ単位での設定は出来ません。

以下 3 つはヒストグラム・データを CNH データに置き換えるための設定パラメータです。

- **start\_bin:** CNH データにおけるデバイス・ヒストグラム・データの最初の bin を定義します
- **num\_bins:** CNH ヒストグラムに組み込む bin の数を定義します
- **sub\_sample:** CNH ヒストグラム・binごとに結合させたいヒストグラムの bin の数を定義します

これらの 3 つのパラメータの使用例を以下に示します。

図 16. ヒストグラム設定の例



これら 3 つのヒストグラムの設定は、`vl53lmz_cnh_init_config()`で行います。

```
uint8_t vl53lmz_cnh_init_config( VL53LMZ_Motion_Configuration *p_mi_config,
    int16_t start_bin,
    int16_t num_bins,
    int16_t sub_sample );
```

## 5.5 周辺光レベル・データ

CNH データでは、ヒストグラム・データ以外にセンサ・ゾーンに照射される周辺光のレベルも記録されます。周辺光レベルは各 CNH ヒストグラムで測定され、ゾーン・アグリゲーションで設定したゾーンごとにヒストグラム・データと共に蓄積されています。

そのため、周辺光レベルは  $\text{W/m}^2$  のような絶対単位ではなく、ヒストグラム・bin に使用されるのと同じスケーリングを持つ任意の単位となります。

## 5.6

### CNH データ・サイズの制限

VL53L7CH および VL53L8CH の CNH データサイズは、最大 6160 バイトに制限されています。CNH の設定を行う際は、この制限を超えないように注意が必要です。

- 各ヒストグラム・ビンは 5 バイトです
- 各周辺光レベル(ambient level)の値は 5 バイトです
- 28 バイトの固定のオーバーヘッドも含める必要があります

以上より必要なメモリ・サイズの合計は次のような計算式となります。

$$\text{Total\_CNH\_Bytes} = \langle\text{ヒストグラム・ビンの数}\rangle * 5 + \langle\text{ゾーン・アグリゲーションの数}\rangle * 5 + 28$$

$$\text{Total\_CNH\_Bytes} = (\text{rows} * \text{cols} * \text{num\_bins}) * 5 + (\text{rows} * \text{cols}) * 5 + 28$$

## 5.7

### CNH のデータ・フォーマット

ヒストグラム・ビンのデータと周辺光レベルのデータは、センサデータの非常に幅広いダイナミック・レンジに対応するため、1 データ辺り 5 バイトのフォーマットを使用しています。

各データは、符号付整数に 4 バイトが使用され、スケール値に 1 バイト使用されます。

最終的な値は、次のように浮動小数点の値として計算されます。

$$\text{浮動小数点の値} = 32\text{b\_signed\_integer} / (2^{\wedge} 8\text{b\_integer})$$

## 5.8

### CNH データ

CNH データのサイズは、使用中の CNH 設定によって大きく変わるため、ゾーンに基づいた測距データに使用される固定サイズでのデータ転送は効率的ではありません。そのため、VL53L7CH/VL53L8CH ULD ドライバでは、初期化中にデータの送信サイズを設定できるように設計されています。

この設定方法の例については、ULD 内に格納されたサンプル・コード(Example\_12\_cnh\_data.c)を参照してください。

CNH バッファ内でセンサによって生成されるデータは、ヘッダ・ブロックと 4 つのデータ・サブブロックに分かれています。サブ・ブロックのサイズと場所は、使用中の CNH 設定によって異なります。ブロックの順序は次のとおりです。

- ヘッダ・ブロック: 28 バイト
- ヒストグラム・データ:  $(\text{rows} * \text{cols} * \text{num\_bins})$  32b 符号付整数
- ヒストグラム・データ:  $(\text{rows} * \text{cols} * \text{num\_bins})$  8b スケール値
- 周辺光レベル:  $(\text{rows} * \text{cols})$  32b 符号付整数
- 周辺光レベル:  $(\text{rows} * \text{cols})$  8b スケール値

ヒストグラム内で、ブロック・データはアグリゲート番号、次にビン番号により順序付けられます。

周辺光ブロック内では、データはアグリゲート番号により順序付けられます。

ブロック・データの開始位置は 4 バイトに揃えられ、必要に応じてパディング・バイトが挿入されます。

vl53lmz\_plugin\_cnh 内では、vl53lmz\_cnh\_get\_block\_addresses()により各アグリゲートのデータ領域の開始位置が計算されます。

## 6 測定結果

### 6.1 提供されるデータ

測距実行中に対象物や環境に関する広範囲に渡るデータが出力されることがあります。以下の表に、ユーザに提供されるデータを示します。

表 3. センサ使用時に得られる出力データ

出力データ	バイト数(RAM)	単位	説明
Ambient per SPAD (SPADあたりの周辺光レベル)	256	Kcps/SPAD	周辺光を SPAD で測定。光子は発光させず、周辺光の信号をノイズとして測定。
Number of targets detected(検出した対象物の数)	64	なし	各ゾーン内で検出した対象物の数。測定の妥当性を確認するため、この値を最初にチェックする必要がある。
Number of SPADs enabled(有効な SPAD の数)	256	なし	現在の測定で有効になっている SPAD の数。対象物が遠くにある場合や低反射率の対象物の場合、より多くの SPAD が有効になる。
Signal per SPAD (SPADあたりの信号量)	256 × 設定した測定対象物の数	Kcps/SPAD	VCSEL パルス発光中に測定された光子量
Range sigma(測距データのシグマ値)	128 × 設定した測定対象物の数	ミリメートル	取得した対象物までの距離データに対するノイズの概算のシグマ値
Distance(距離)	128 × 設定した測定対象物の数	ミリメートル	対象物までの距離
Target status(ターゲット・ステータス)	64 × 設定した測定対象物の数	なし	測定の妥当性を判定。詳細については、セクション 6.5: 測定結果の判断についてを参照。
Reflectance(反射率)	64 × 設定した測定対象物の数	%	対象物の推定反射率
Motion indicator(モーション・インジケータ)	140	なし	モーション・インジケータの結果を格納。動きの大きさを表す値が格納される。

#### 注

いくつかの出力データ(SPADあたりの信号量、シグマ値など)については、ゾーンごとに複数の対象物をプログラムしている場合、データへのアクセス方法が異なります(セクション 4.10: Multiple targets per zone(ゾーンごとの複数物体検出)を参照)。詳細はサンプル・コードを参照してください。

### 6.2 出力データのカスタマイズ

デフォルトでは全てのデータ出力が有効になっていますが、必要に応じてセンサ出力の一部を無効にすることができます。

設定はドライバではできず、「platform.h」ファイル内で行う必要があります、次のマクロ出力を無効にできます。

```
#define VL53LMZ_DISABLE_AMBIENT_PER_SPAD
#define VL53LMZ_DISABLE_NB_SPADS_ENABLED
#define VL53LMZ_DISABLE_NB_TARGET_DETECTED
#define VL53LMZ_DISABLE_SIGNAL_PER_SPAD
#define VL53LMZ_DISABLE_RANGE_SIGMA_MM
#define VL53LMZ_DISABLE_DISTANCE_MM
#define VL53LMZ_DISABLE_TARGET_STATUS
#define VL53LMZ_DISABLE_REFLECTANCE_PERCENT
#define VL53LMZ_DISABLE_MOTION_INDICATOR
```

無効と設定したデータはホストに送信されず、結果として RAM サイズと I<sup>2</sup>C/SPI の通信時の負荷を小さくすることができます。

但し、データの整合性を保証するため、ST マイクロエレクトロニクスでは「number of target detected(検出する対象物の数)」と「target status(ターゲット・ステータス)」を有効のままにすることを推奨しています。特にターゲット・ステータスによって測定結果の有効性をフィルタリングすることができます(セクション 6.5: 測定結果の判断についてを参照)。

## 6.3 測距結果の取得方法

測定を行うにあたって、新しい測距データが使用可能な状態になったことを以下の2つの方法で知ることができます。

- ポーリング・モード: 繼続的に `vl53lmz_check_data_ready()` を使用して測距データを入手します。センサから返される新しいストリーム・カウントを確認します。
- 割込みモード: INT ピンの割込み発生を待ちます。割込みは、最大 100 $\mu$ s 後に自動的にクリアされます。

新しいデータが使用可能な状態になれば、`vl53lmz_get_ranging_data()` を使用して結果を読み出すことができ、選択したすべての出力データを取得することができます。デバイスは非同期であるため、測距を続行するために INT ピンをクリアする必要はありません。

この機能は、連続測距モード(Continuous mode)と自律型測距モード(Autonomous mode)の両方で利用できます。

## 6.4 生のファームウェア・フォーマット・データの使用について

センサの出力データやドライバからの制御信号は I<sup>2</sup>C/SPI を介して送信された後、ファームウェア・フォーマットとホスト・フォーマットの間で変換が行われます。通常この工程は mm 単位の測定距離を取得するために行われるデフォルトのセンサ出力となっています。ファームウェア・フォーマットを使用する場合には、プラットフォーム・ファイルで次のマクロを定義する必要があります。

```
#define VL53LMZ_USE_RAW_FORMAT
```

## 6.5 測定結果の判断について

測定した対象物の状況を判断するため、センサから返されたデータをターゲット・ステータスを用いてフィルタリングすることができます。ターゲット・ステータスは測定結果の妥当性を示しています。以下の表に、各ステータスについて内容を示します。

表 4. ターゲット・ステータスのリスト

ターゲット・ステータス	内容
0	測距データが更新されていない
1	SPAD アレイに返ってきた信号が少なすぎる
2	位相異常
3	シグマの推定値が高すぎる
4	測定した対象物のデータの整合性に問題がある
5	測定値は妥当(Range valid)
6	ラップアラウンド・フィルタが実行されていない(通常、最初の測距時に発生)
7	返ってきた信号の整合性に問題がある
8	現在の対象物に対して返ってきた信号量が少なすぎる
9	測距結果は妥当だが、パルスが大きい(測距データがマージされた可能性がある)
10	測距結果は妥当だが、前の測距フレームで対象物が検出されていない
11	測距結果の整合性に問題がある
12	シャープナー機能が原因で、対象物が別の対象物によって不鮮明になっている
13	対象物は検出されたが、測距データに整合性がない。2番目の対象物に頻繁に発生する。
255	対象物が検出されない(number of target detected の設定が有効になっている場合のみ)

有効なデータを得るには、無効な測定結果のステータスを使ってフィルタリングする必要があります。信頼性の高いデータについては、ステータス 5 の測距データを 100% 信頼のおけるデータとみなすし、ステータス 6 または 9 については 50% の信頼度とみなすことができ、それ以外のステータスはすべて、50%未満の信頼度とみなすことができます。

## 6.6 エラー・コード

センサの使用中にエラーが発生した場合、ドライバから特定のエラー・コードが返されます。以下の表に、発生する可能性のあるエラーを示します。

表 5. エラー・コードのリスト

ターゲット・ステータス	内容
0	エラーなし
1	タイムアウト(センサの応答に時間がかかりすぎる)
2	フレーム破損(測距中にのみ発生)
3	モジュールが破損していて、レーザの安全が損なわれている。センサを起動できない
4	既知のモジュールを検出できない
66	センサ内部のファームウェアから正しい応答が得られない
127	ユーザがプログラムした設定に誤りがある(不明な分解能、高すぎる測定周波数など)
255	主要なエラー(通常は I <sup>2</sup> C/SPI エラーが原因のタイムアウト・エラー)
その他	上記エラーの組合せ

注

これ以外のエラー・コードをホストで実装するには、プラットフォーム・ファイルを使用します。

## 改版履歴

表 6. 文書改版履歴

日付	版	変更内容
2023 年 6 月 16 日	1	初版発行
2024 年 1 月 5 日	2	セクション 4.6: Integration time(積分時間): 対象物の誤検出に関する記述を追加 セクション 4.7: 動作モード: ディープスリープモードを追加
2024 年 4 月 4 日	3	セクション 2.3: I <sup>C</sup> /SPI 接続と概要: 「スレーブ」を「フォロワ」に更新 セクション 4.2: センサのリセット方法を更新。 表 2. 最小周波数と最大周波数: 注を追加。

## 目次

<b>1</b>	<b>略記と略語</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>機能説明</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>システム概要</b>	<b>3</b>
<b>2.2</b>	<b>検出方向</b>	<b>3</b>
<b>2.3</b>	<b>I<sup>2</sup>C/SPI 接続と概要</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>パッケージの内容とデータ・フロー</b>	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>ドライバのアーキテクチャとコンテンツ</b>	<b>6</b>
<b>3.2</b>	<b>キャリブレーション(補正)について</b>	<b>7</b>
<b>3.3</b>	<b>測距の流れ</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>搭載機能</b>	<b>9</b>
<b>4.1</b>	<b>初期化</b>	<b>9</b>
<b>4.2</b>	<b>センサのリセット方法</b>	<b>9</b>
<b>4.3</b>	<b>Resolution(分解能)</b>	<b>9</b>
<b>4.4</b>	<b>Ranging frequency(測定周波数)</b>	<b>9</b>
<b>4.5</b>	<b>Ranging mode(測距モード)</b>	<b>10</b>
<b>4.6</b>	<b>Integration time(積分時間)</b>	<b>10</b>
<b>4.7</b>	<b>動作モード</b>	<b>11</b>
<b>4.8</b>	<b>Sharpener(シャープナー)</b>	<b>11</b>
<b>4.9</b>	<b>Target order(測定優先順位)</b>	<b>12</b>
<b>4.10</b>	<b>Multiple targets per zone(ゾーンごとの複数物体検出)</b>	<b>12</b>
<b>4.11</b>	<b>Xtalk マージン</b>	<b>12</b>
<b>4.12</b>	<b>Detection thresholds(閾値検出)</b>	<b>13</b>
<b>4.13</b>	<b>Interrupt autostop(自動割込み停止機能)</b>	<b>13</b>
<b>4.14</b>	<b>Motion indicator(モーション・インジケータ)</b>	<b>13</b>
<b>4.15</b>	<b>外部同期ピン(VL53L8CH のみ)</b>	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>コンパクト・ノーマライズド・ヒストグラム(CNH)について</b>	<b>15</b>
<b>5.1</b>	<b>はじめに</b>	<b>15</b>
<b>5.2</b>	<b>CNH 設定</b>	<b>15</b>
<b>5.3</b>	<b>Zone aggregation(ゾーン・アグリゲーション)</b>	<b>15</b>
<b>5.4</b>	<b>ヒストグラム設定</b>	<b>16</b>
<b>5.5</b>	<b>周辺光レベル・データ</b>	<b>16</b>
<b>5.6</b>	<b>CNH データ・サイズの制限</b>	<b>17</b>
<b>5.7</b>	<b>CNH のデータ・フォーマット</b>	<b>17</b>
<b>5.8</b>	<b>CNH データ</b>	<b>17</b>

---

<b>6</b>	<b>測定結果</b>	18
<b>6.1</b>	提供されるデータ	18
<b>6.2</b>	出力データのカスタマイズ	18
<b>6.3</b>	測距結果の取得方法	19
<b>6.4</b>	生のファームウェア・フォーマット・データの使用について	19
<b>6.5</b>	測定結果の判断について	19
<b>6.6</b>	エラー・コード	20
	<b>改版履歴</b>	21

**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 製品および本書の内容をいつでも予告なく変更、修正、改善、改定およ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、注文請求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 製品が再版された場合、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。

この資料は、STMicroelectronics NV 並びにその子会社(以下 ST)が英文で記述した資料(以下、「正規英語版資料」)を、皆様のご理解の一助として頂くために ST マイクロエレクトロニクス株が英文から和文へ翻訳して作成したものです。この資料は現行の正規英語版資料の近時の更新に対応していない場合があります。この資料は、あくまでも正規英語版資料をご理解頂くための補助的参考資料のみにご利用下さい。この資料で説明される製品のご検討及びご採用にあたりましては、必ず最新の正規英語版資料を事前にご確認下さい。ST 及び ST マイクロエレクトロニクス株は、現行の正規英語版資料の更新により製品に関する最新の情報を提供しているにも関わらず、当該英語版資料に対応した更新がなされていないこの資料の情報に基づいて発生した問題や障害などにつきましては如何なる責任も負いません。

© 2023 STMicroelectronics – All rights reserved