

## **AFBR-S50-BAS**

### **ToF(Time of Flight)方式測距イメージセンサの基礎**

アプリケーションノート

バージョン **1.0**

Broadcom、pulse のロゴ、Connecting everything、Avago Technologies、Avago、および A のロゴは、米国、その他の特定の国、および/または EU における Broadcom および/またはその関連会社の商標です。

Copyright © 2021 Broadcom. All Rights Reserved.

「Broadcom」という用語は、Broadcom Inc. および/またはその子会社を指します。  
詳細は、[www.broadcom.com](http://www.broadcom.com) をご覧ください。

Broadcom は、信頼性、機能、または設計を向上させるために、本書に記載されている製品またはデータを予告なく変更する権利を留保します。Broadcom が提供する情報は、正確かつ信頼できるものと考えられていますが、Broadcom は、本情報の適用または使用、および、本書に記載された製品や回路の適用または使用に起因するいかなる責任も負いません。また、Broadcom の特許権または他者の権利に基づく何らかのライセンスを譲渡することはありません。

## 目次

AFBR-S50-BAS アプリケーションノート .....	4
1 はじめに.....	4
2 測定原理.....	4
2.1 直接 ToF.....	4
2.2 間接 ToF.....	4
3 用語および定義.....	5
3.1 レンジと振幅の計算.....	5
3.2 曖昧さと曖昧さのない範囲.....	6
3.3 二重周波数モード.....	8
3.4 視野 (FoV) .....	9
3.4.1 発光部のスポットサイズ.....	10
3.4.2 対象物の最小サイズ.....	11
3.4.3 Tx FoV と Rx FoV の相互作用.....	12
3.4.4 AFBR-S50 モジュールファミリー - 検出特性の概要.....	13
4 静的検出アルゴリズムと動的検出アルゴリズム.....	15
4.1 静的 - ピクセルビニングアルゴリズム (PBA) .....	15
4.1.1 PBA の例.....	16
4.2 動的 - 動的コンフィギュレーションアルゴリズム (DCA) .....	18
4.2.1 DCA の例.....	19
5 目に対するレーザーの安全性.....	21
5.1 動作中のハードウェアで実施される安全対策.....	22
5.2 動作中にソフトウェアに実装される安全対策.....	22
6 アプリケーションプログラミングインターフェース.....	22
6.1 概要.....	23
6.2 EEPROM データ.....	24
6.3 必要最小メモリー.....	24
7 よくある質問.....	25
7.1 Broadcom の iToF センサーを使用するにはどうすればよいですか?.....	25
7.2 AFBR-S50 センサーの FoV とは何ですか? センサーが使用するピクセル数はいくつですか?.....	25
7.3 レーザークラス1での動作はどのように保証されますか?.....	25
7.4 iToF センサーの総合的な性能に影響を与えるのは何ですか?.....	25
7.5 なぜ PBA でプレフィルタースマスクを使うのでしょうか?.....	25
7.6 AFBR-S50 API をプロジェクトに実装するにはどうすればよいのでしょうか?.....	25
7.7 SDK の新しいバージョンがダウンロード可能かどうかはどうすればわかりますか?.....	25
8 参考文献.....	27
改訂履歴.....	28

# AFBR-S50-BAS アプリケーションノート

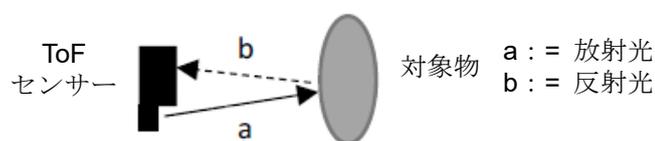
## 1 はじめに

距離や動きの測定には、高ダイナミックレンジ、高速、高精度、および対象の表面素材に依存しないことが要求されます。その要求に応えるべく、ToF(Time of Flight)技術は進化しています。その一方で、システムインテグレーターやセンサーのユーザーは、用途における要求事項にセンサーの仕様が適合するかを慎重に確認する必要があります。この作業を容易に進めるため、このアプリケーションノートでは、Broadcom® ToF 技術の基本情報、測定原理の概要、AFBR-S50 センサープラットフォームの製品群を紹介しています。

## 2 測定原理

“Time of flight” という言葉から、光学測定法の基本的な考え方がわかると思いますが、発光部 (Tx) から放射された光が、何らかの物体に反射されて受光部 (Rx) に戻る時間を利用して、距離を測定 (約 30cm/ns) できます。

図 1 : ToF の原理



原則として、2 種類の方法によりこの物理現象から距離が導き出されます。

### 2.1 直接 ToF

パルス測距法とも呼ばれます。直接 ToF 方式のデバイスは、単一パルスが **a** および **b** を通過する際の経過時間を測定します (図 1 を参照)。最終距離 **d** を計算する式は以下のとおりです。

$$d = \frac{c_0 \Delta T}{2} \quad (1)$$

$c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s}$  を真空中の光の速度、 $\Delta T$  を発光から受光までの経過時間とします。この測距技術は、発光部の高ピーク出力と高帯域幅に加え、正確な時間計測、単一パルスエッジ検出を必要とし、現実的なコストに抑えたハードウェアを実現することは簡単ではありません。

### 2.2 間接 ToF

光の伝搬時間を直接取得するのとは異なり、変調された連続波 (CW) を使用し、発光連続波と受光連続波の位相差から距離を測定できます。最終距離 **d** を計算する式は以下のとおりです。

$$d = \frac{c_0}{2f_{mod}} \frac{\Delta\phi}{2\pi} \quad (2)$$

この計算には、 $c_0$  以外に、レーザー変調周波数  $f_{mod}$  と位相差  $\Delta\phi$  を使います。位相差  $\Delta\phi$  は、**a** と **b** を通過する光の伝搬時間から生じます (図 1 を参照)。 $f_{mod}$  は、間接 ToF センサーの明瞭な範囲を定義します。詳しくは、[セクション 3.2 「曖昧さと曖昧さのない範囲」](#) で説明します。

直接 ToF とは対照的に、連続波を使用する間接 ToF には以下のような利点があります。

- 電子的信号増幅が不要（新たなノイズ源を回避できます）。
- 発光部のピーク出力は、直接 ToF の場合よりも 1 桁低く済む。
- パルスのエッジ検出は不要にも関わらず、完全なパルス形状を得られる。
- 単一パルス整形の要件が緩和される。
- 3D 測距と動き検出のために、ASIC の複雑さを軽減できる。
- より小型のモジュールフォームファクターが採用できる。

Broadcom の AFBR-S50 センサー技術は間接 ToF に基づいているため、ToF に関する以降のすべての説明では iToF と呼びます。

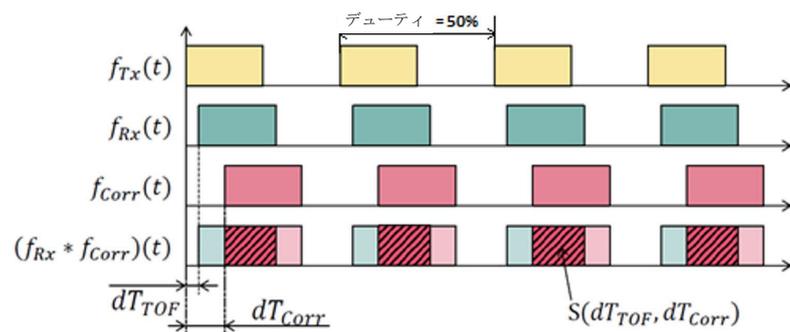
### 3 用語および定義

#### 3.1 レンジと振幅の計算

前節で述べたとおり、AFBR-S50 のセンサー出力は位相差に基づいて生成されます。これは、iToF ASIC 内で、受光された信号と位相シフトされた相関信号のクロスコレーション（図 3 で説明）を実行することで実現されます。相関信号は駆動された発光部の信号から派生されます。デフォルトでは、Broadcom iToF デバイスは、 $\pi/2$ 、 $\pi$ 、 $3\pi/2$ 、 $2\pi$  の 4 つの位相シフトで動作するように設定されていて、それぞれサンプル S0、S1、S2、S3 として、生の値が出力されます。

下の図は、 $\pi/2$  変移した相関信号でサンプル S0 を取得するタイミングを例示したものです。

図 2 : iToF の相関信号図



説明

$dT_{TOF}$  : iToF 遅延時間

$dT_{Corr}$  : 位相遅延時間

$f_{Tx}(t)$  : 発光部の信号

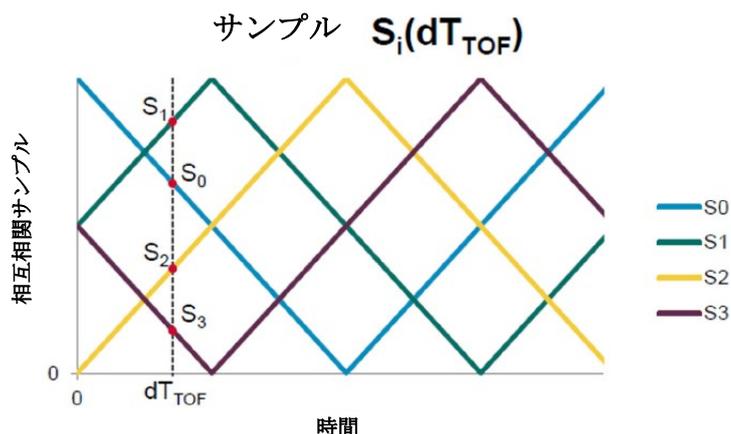
$f_{Rx}(t)$  : 受光部の信号

$f_{Corr}(t)$  : 相関信号

$(f_{Rx} * f_{Corr,i})(t)$  : 受光部の信号と相関信号のたたみ込み、位相が  $i$  回シフトされます ( $i = 4$ )

Broadcom iToF レーザー光源は、常に固定デューティサイクル 50% の矩形パルスで変調されるため、たたみ込みの出力は、次の図で  $dT_{TOF}$  に応じて示す 4 つの位相すべてについて、三角形のチャートとなります。

図 3 : 4 相サンプル



これらの 4 つのサンプルを使用して、接続されたマイクロコントローラー (MCU) 内のデバイスソフトウェアが以下の後計算を実行します。

- i. 位相差  $\Delta \phi$
- ii. 振幅  $A$
- iii. 距離  $d$

計算を簡単にするために、いわゆる線形化した正弦信号と余弦信号が以下の式で使用、定義されます。

$$\begin{aligned} s &\equiv S_2 - S_0 \\ c &\equiv S_3 - S_1 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、位相差  $\Delta \phi$  は、 $s$  と  $c$  に応じて以下の式により計算されます。

$$\Delta\phi(\pi) = \frac{1}{4} \begin{cases} 1 + \frac{s+c}{2A} & s < 0, c \geq 0 \\ 3 + \frac{s-c}{2A} & s \geq 0, c \geq 0 \\ 5 + \frac{-s-c}{2A} & s \geq 0, c < 0 \\ 7 + \frac{-s+c}{2A} & s < 0, c < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$A$  は振幅または信号強度であり、以下のように定義されます。

$$A \equiv \frac{1}{2} (|s| + |c|) \quad (5)$$

最終的な距離は、(2) に従って計算されます。

### 3.2 曖昧さと曖昧さのない範囲

発光部の信号と受光部の信号の位相差に基づく iToF センサーには、曖昧さと呼ばれる物理的限界があります。位相は周期的な情報であるため、下図の正弦波の例で示すとおり、その値は  $2\pi$  に繰り返し束縛されます。

図 4 : ラジアン単位の 1 周期



本質的な曖昧さにより、 $2\pi$ の値を超えた位相は、1周期前の位相と等距離になります。つまり、次の図に示すとおり、ある対象が1周期内にはではなく、1週期後に現れた場合に距離が曖昧になります。

図5：距離の曖昧さ

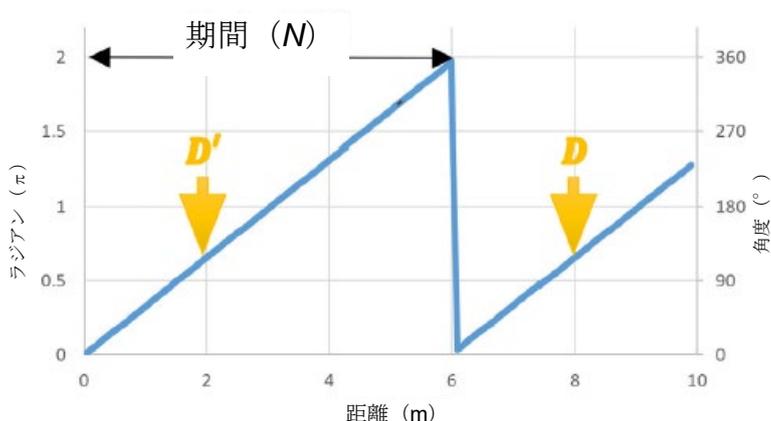


図5は、6メートルで $2\pi$ に達し、ある対象物が8メートル(D)に位置するか2メートル(D')に位置するかを区別できないiToFセンサーの例を示し、これは、(2)を以下の式に拡張することによって数学的に表現されます。

$$d = \frac{c_0}{2f_{mod}} \left( \frac{\Delta\phi}{2\pi} + N \right) \quad (6)$$

$N = 0, 1, 2, \dots$ はN番目の周期またはウィンドウとします。

なぜこのようなことが起こるのかをより深く理解するために、式(2)を見てみましょう。

$$d = \frac{c_0}{2f_{mod}} \frac{\Delta\phi}{2\pi}$$

$\Delta\phi = 2\pi$ の位相差を使用する場合、この式は第2項によって相殺され、以下の式となります。

$$d = \frac{c_0}{2f_{mod}} \quad (7)$$

これで、距離が変調周波数 $f_{mod}$ のみに依存することがわかりました。次の図は、このiToFセンサーの変調周波数と曖昧さのない範囲の関係を示しています。

図6：変調周波数と曖昧さのない範囲

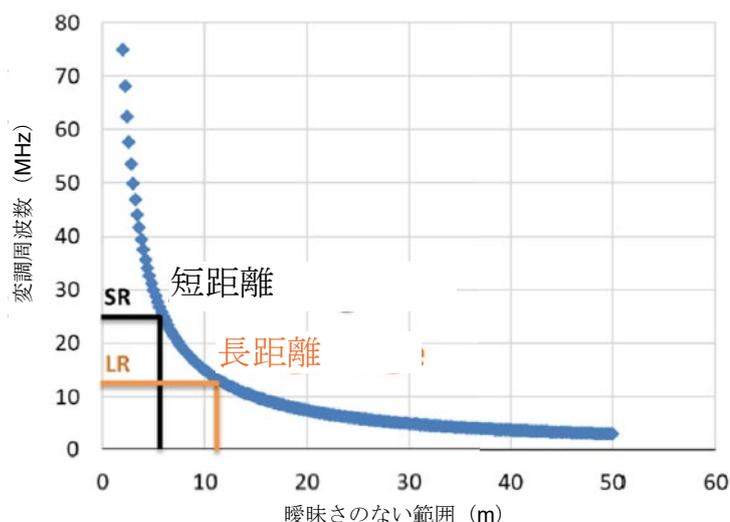


図6の青い点と線は、曖昧さのない範囲が変調周波数の低下とともに増大していることを示しています。

図6に示されたもう1つの兆候として、BroadcomのAFBR-S50センサーに使用される2つのデフォルトの、調整不可能な変調周波数があることが挙げられます。

表 1 : AFBR-S50 のレンジモード

Broadcom AFBR-S50 の仕様		
モード	曖昧さのない範囲 <sup>a</sup>	変調周波数
短距離	6.25 m	24 MHz
長距離	12.5 m	12 MHz

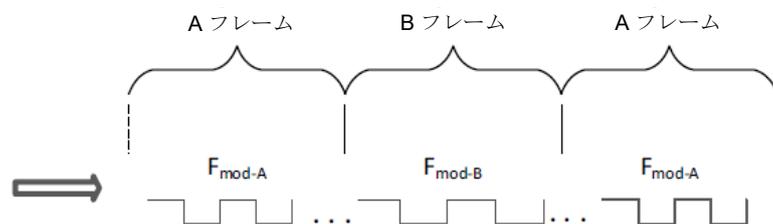
a. DFM なし。セクション 3.3 二重周波数モードを参照。

これらの iToF センサーの本質的な曖昧さによって、測定可能な距離に境界が生じているように思われるため、次のセクションでは、曖昧さのない範囲の制限を克服し、これを拡張する方法を紹介します。

### 3.3 二重周波数モード

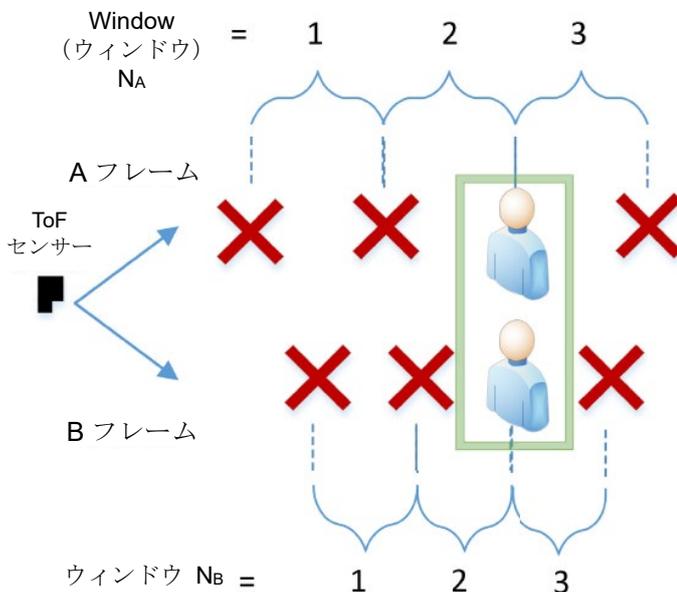
二重周波数モード (DFM) では、2 種類の変調周波数によって連続するフレームの位相情報を取得できます。これらの周波数は、短距離と長距離の公称変調周波数に由来し、これらをわずかに離調したものです。

図 7 : DFM フレーミング



変調周波数ごとに曖昧さのない範囲が異なるため、各周波数における位相差が共通の距離になるのは 1 回だけとなるので、対象 (たとえば人間) の位置を正確に判定することが可能です。

図 8 : DFM の手順



ここで、DFM のアルゴリズムは、距離  $d_A$  と  $d_B$  が等しくなるような適切なウィンドウ  $N_A$  と  $N_B$  を特定しようとしています。

これは曖昧さのない範囲にどのような影響を与えるのか？

この方法の利点は、 $\Delta f = f_B - f_A$  により与えられる A と B の周波数差を活用することです。

これにより、式 (7) が以下のように変わります。

$$d = \frac{c_0}{2(f_A - f_B)} = \frac{c_0}{2\Delta f}$$

ここでは、例として、 $f_A = 22.5 \text{ MHz}$ 、 $f_B = 25.5 \text{ MHz}$  (x8 DFM モード) とします。

24 MHz の単一変調周波数（短距離モード）と 3MHz の最小周波数差  $\Delta f$  を考慮すると、以下の比率で曖昧さのない範囲が拡大されることがわかります。

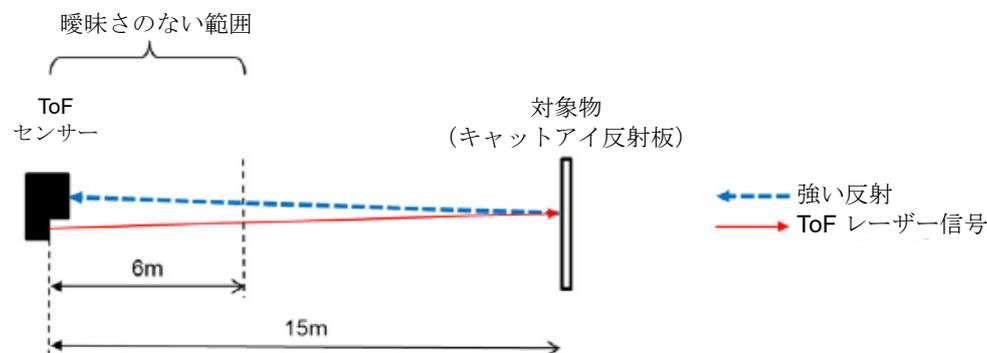
$$Ratio_{f_{mod}} = \frac{24 \text{ MHz}}{3 \text{ MHz}} = 8$$

言い換えれば、24 MHz の 1 つの変調周波数の代わりに 3 MHz の周波数差のある 2 つの変調周波数を使用する場合、曖昧さのない範囲を 8 倍に拡大することができます。

実用時の効果はどのようなものか？

iToF センサーが 15 メートル先の高反射対象物（たとえばキャットアイ）に向けられている下図の状況を想像してみましょう。曖昧さのない範囲が 6 メートルと仮定すると、センサーの距離は実際の 15 メートルではなく、3 メートルとなります。衝突回避などの機能は、このようなセンサーによって誤ってトリガーされてしまいます。

図 9：実用における曖昧さ

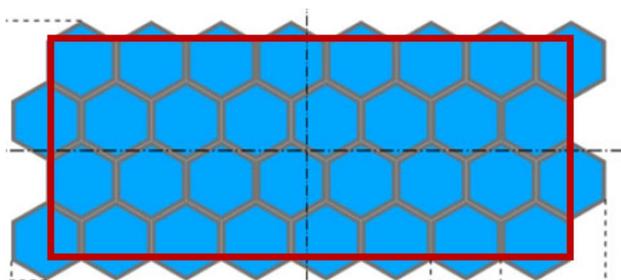


DFM を使用することで、iToF の曖昧さのない範囲の外の対象物を検出することが可能になり、実用上の観点から、遠距離にある高反射対象物にも正しく反応できるようになります。ただし、より多くのフレーム（3 フレーム以上）の比較と追加のフィルタリングが必要なため、この方法を採用することで、反応時間が長くなり（2 フレームではなく 3 フレーム）、単一周波数動作モードに比べて最大フレームレートが 100 Hz 低下します。

### 3.4 視野 (FoV)

iToF センサーの空間的有効範囲を定める FoV は、iToF センサーを使用する際の最も重要なパラメーターの一つです。すべての AFBR-S50 センサーの受信側には、4 行 8 列の 32 ピクセルアレイがあります。設計上、各ピクセルの FoV は  $1.55^\circ \times 1.55^\circ$  で、Rx の全 FoV は  $12.4^\circ \times 6.2^\circ$  となります。ピクセルが六角形であるため、フィルファクター100%での有効 FoV は、図 10 の長方形で示すように  $11.7^\circ \times 5.1^\circ$  となります。平均して、Rx の FoV は  $12.4^\circ \times 5.4^\circ$  になります。

図 10：Rx ピクセルアレイ



たとえば、双眼鏡で見るのと光学センサーで距離を測るのとでは、FoV の定義に違いがあります。後者については、発光側も重要な役割を果たします。より正確に言うと、iToF ピクセルアレイは、その発光部によって照射されていない対象物に対しては反応しません。

### 3.4.1 発光部のスポットサイズ

このコンセプトをより深く理解するために、AFBR-S50MV85G iToF センサーの光学パラメーターをいくつか見てみましょう。

表 2：光学パラメーターの例

パラメーター	種類
Tx ビーム発散角	4°
1 m での光スポット径	70 mm
1 m でのピクセル FoV	27 mm

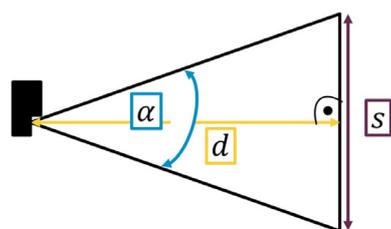
ビーム発散角は、受光部またはピクセルの FoV と対になる発光部の視野に相当します。これにより、ある距離における光スポットの直径を計算できます。これは、出射ビームの形状を円錐形と仮定し、下図に示すような単純な三角法を適用することによって行われます。以下のパラメーターが定義されています。

$\alpha$  : ビーム発散角

$d$  : 対象物までの距離

$s$  : スポットサイズ

図 11：スポットサイズの計算



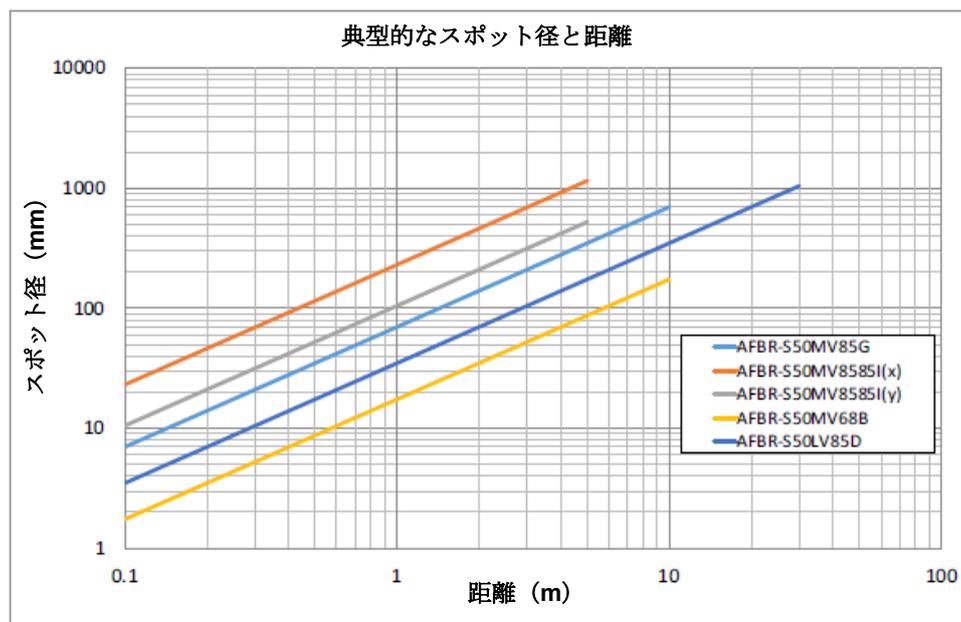
簡単な三角法を適用することで、スポットサイズを以下の式により計算できます。

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{s/2}{d} \quad s = 2d \tan \frac{\alpha}{2} \approx d \tan \alpha$$

$$\rightarrow s_{Spot} = d \times \tan \alpha \quad (8)$$

以下のチャートは、式 (8) を用いて異なる距離における AFBR-S50 センサーモジュールの典型的なスポットサイズ  $s$  を示しています。

図 12 : 典型的なスポット径と距離

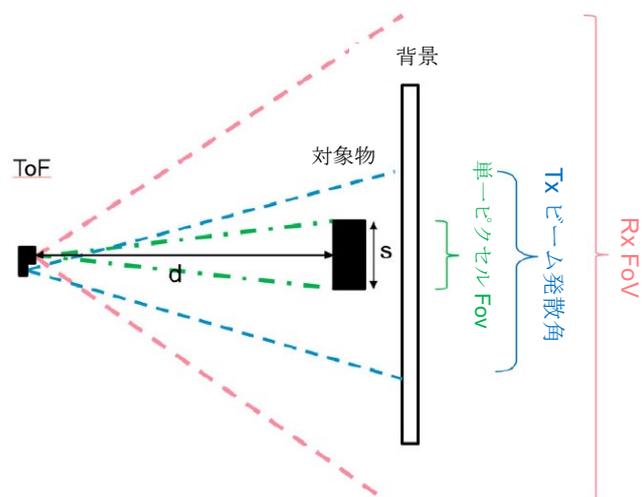


なお、ビーム発散角は一般的に理想的ガウス分布に沿った放射強度プロファイルを持ち、ハードリミットはありません。スポットサイズは一般的にビームの広がりを含意し、その中で強度が最大値から  $1/e^2$  (13.5%) に減少します。

### 3.4.2 対象物の最小サイズ

ビーム発散角により発光側のスポットサイズが決まるのに対して、ピクセル FoV は、センサーが解像できる対象物の最小サイズにとって重要なパラメータです。次の図は、測定に影響を与えるすべての FoV の概要を色分けで示しています。この図に示された FoV は、その比率が、ビーム発散角が通常は  $4^\circ$  の AFBR-S50MV85G センサーのビーム発散角の場合の各 FoV の比率と同じになるように描かれています。

図 13 : センサーの FoV



また、上図は、決定パラメーターが  $1.55^\circ \times 1.55^\circ$  で定義される単一ピクセルの FoV を示しています。そして、式 (8) を再度使用して、検出可能な対象物の最小サイズを導き出すことができます。

$$\begin{aligned}
 s_{Object} &\geq d \times \tan 1.55^\circ \\
 &\geq d \times 0.027
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

計算を簡単にし、環境による影響を軽減するために、計算式を次のように簡略化できます。

$$s_{Object} \geq \frac{3}{100} \times d \quad (10)$$

所定の対象物サイズ  $s$  までの最大距離  $d$  は、次のように適宜近似できます。

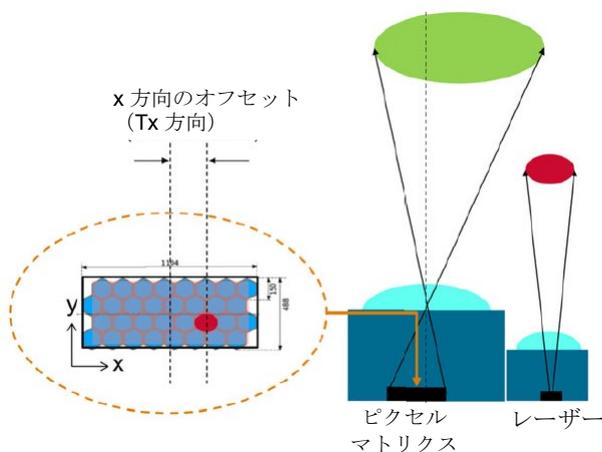
$$d_{maximum} \leq 33 \times s \quad (11)$$

### 3.4.3 Tx FoV と Rx FoV の相互作用

#### 3.4.3.1 視差効果

次の図は、AFBR-S50 モジュールの光学設計と機械設計を示しています。アレイの赤いピクセルで示されるとおり、Rx レンズの頂点は発光部にずれています。この Rx レンズの焦点領域と最大受信信号強度は、ピクセル(5/2)をターゲットとしたものですが、AFBR-S50MV85I には適用されません。

図 14 : AFBR-S50 の光学/機械設計



この機械的/光学的設計により、近くの対象物に対する視差効果が補正されます。視差効果は、Rx レンズが捉えた照射光と反射光の角度が、対象物がモジュールに近づくにつれ大きくなるために発生します。

図 15 : 視差の図

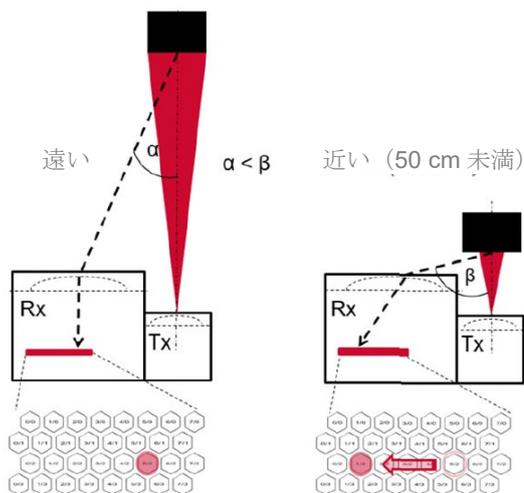


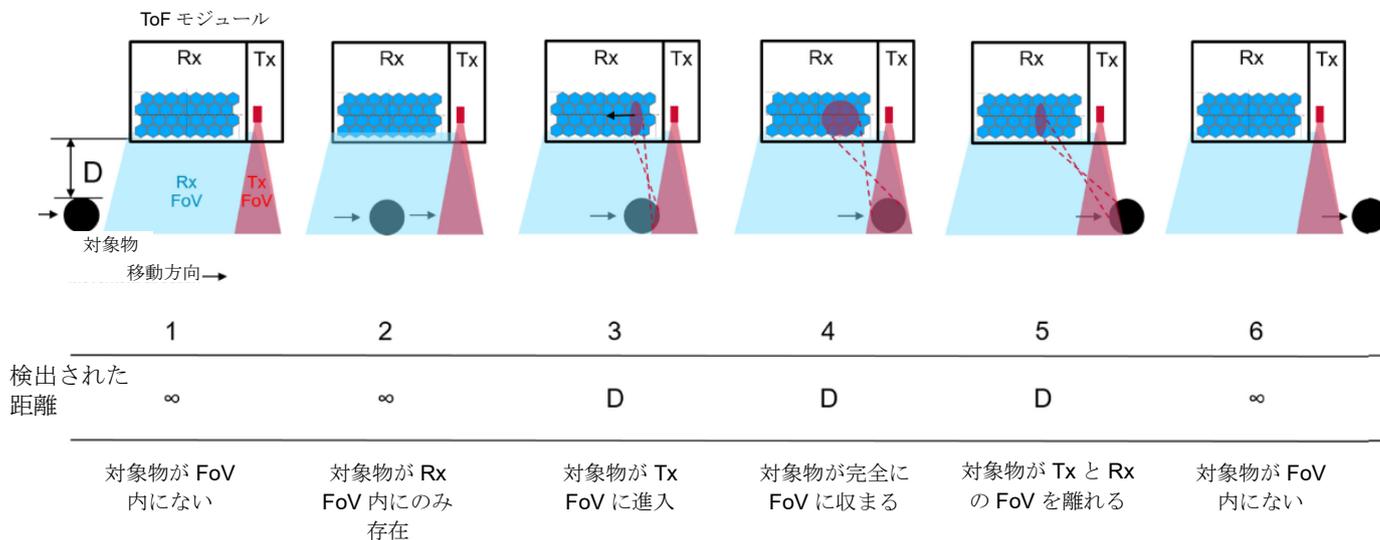
図 15 に示すとおり、視差領域は 50 cm より近い対象物に対して発生しますが、これは通常 Tx と Rx の光軸間の距離によって定義されます。これにより、ピクセルアレイの左側に焦点領域が移動します。

**注記：** この設計により、すべての AFBR-S50 センサーは 32 個のピクセルのアレイを活用して視差効果を補正でき、距離をセンチメートル単位まで測定できるようになります。

### 3.4.3.2 典型的な検出パラダイム

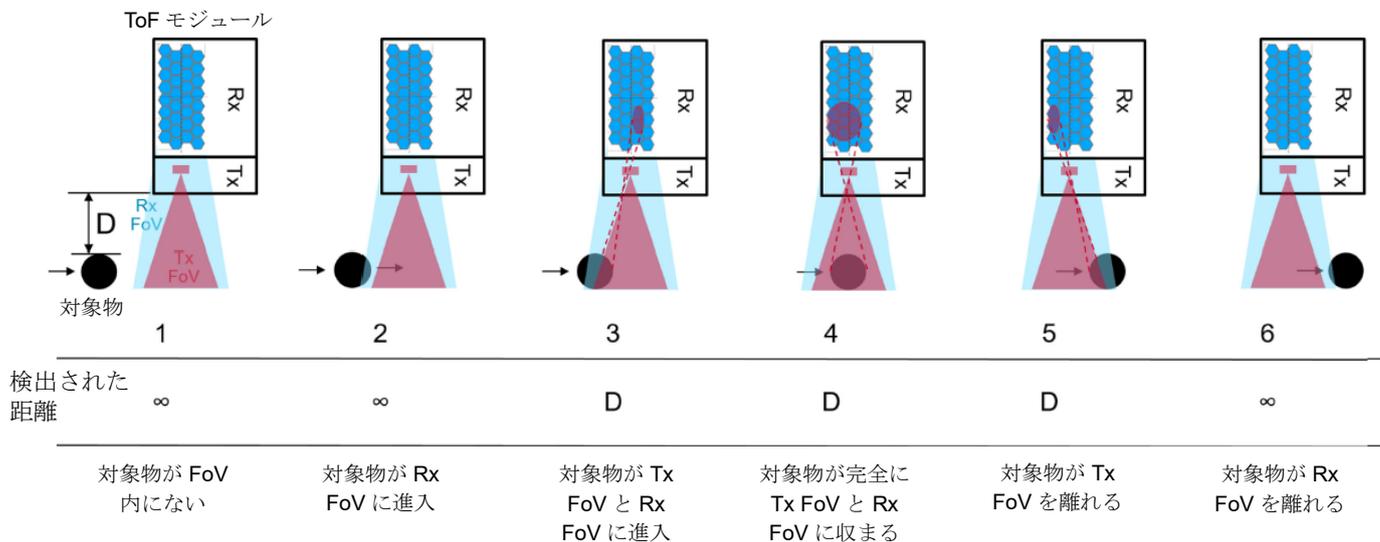
以下の2つの図式は、**AFBR-S50MV85G** モジュールを使用した場合に、ピクセルアレイの水平軸 (x 軸) (図 16) と垂直軸 (y 軸) (図 17) 上の Rx および Tx の FoV を、センサーまでの距離  $d$  の物体が通過するときの AFBR-S50 センサーの光学的な検出の様子を示します。このモジュールは、最長 10 メートルの遠距離を測定するのに十分な狭さでありながら、動きを検出するのに十分幅広いビーム発散角を兼ね備えています。そのため、検出には、受光部側で通常 7 ピクセル (フラワーとも呼ばれます) の限られた数だけを使用します。このシナリオでは、背景が無敵大であると仮定しています。

図 16 : 検出の仕組み (水平)



**注記 :** 対象物は、Tx の FoV 内に入らない限り、センサーによって認識されません。対象物が Tx FoV に進入すると、後方散乱光が Rx レンズによって捕捉され、Tx FoV と Rx FoV における対象物の「没入度」に応じてピクセル領域を照射します。

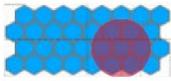
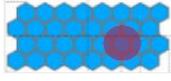
図 17 : 検出の仕組み (垂直)



### 3.4.4 AFBR-S50 モジュールファミリー - 検出特性の概要

以下の表は、単一センサーモジュール間の差異と、それぞれの検出特性の違いを示しています。Tx ビームの発散角とセンサーが測定できる最大距離の間には直接的な関係があることが明らかになっています。前述のとおり、AFBR-S50MV85G は両者の折衷案です。単に距離測定だけが必要な用途では、距離範囲が最大で FoV が小さい AFBR-S50LV85D が最適です。反対に、AFBR-S50MV85I は対象物認識とジェスチャー認識の用途を対象としており、32 個のピクセルすべてを最大 FoV (Tx ビーム形状と Rx FoV が等しい) で使用できます。

表 3 : AFBR-S50 モジュール - 検出特性の概要

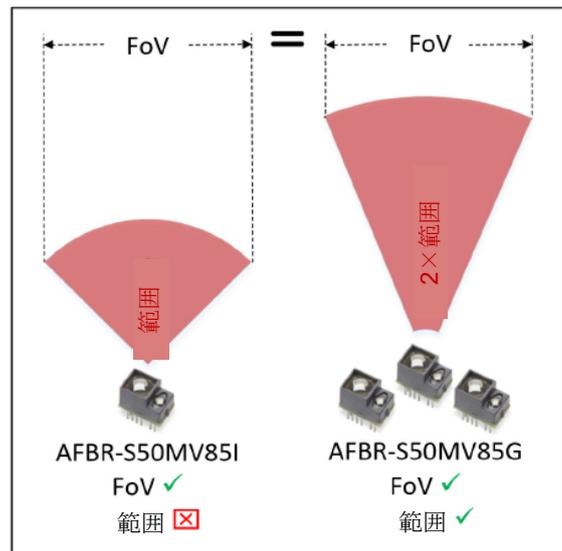
種類	波長 (nm)	典型的なビーム発散角 (X° × Y°)	距離範囲 (m)	2D スポット形状	1 m の距離での Tx スポットサイズ	1 m の距離での Rx 単一ピクセルスポットサイズ	典型的な有効 (= 照射対象) ピクセル数	検出モード
AFBR-S50MV85G	850	4×4	0.01~10	円形	7×7 cm	2.7×2.7 cm	7~16 	距離、方向、1D/3D 速度
AFBR-S50MV85I	850	13×6	0.01~5	長方形	23×10.5 cm		32 	距離、ジェスチャー、方向、1D/3D 速度
AFBR-S50LV85D	850	2×2	0.01~30	円形	3.5×3.5 cm		1~3 	距離、1D 速度
AFBR-S50MV68B	680	1×1	0.01~10	円形	1.75×1.75 cm		1~2 	距離、1D 速度

複数の FoV と最大範囲により、AFBR-S50 モジュールはさまざまな用途で使用できます。さらに、取り得るフレームレートが高いため、実装者は、AFBR-S50LV85D や AFBR-S50MV68B のような非マルチピクセルセンサーについても、1D 速度 (モジュールに向かうか、モジュールから離れるか) の情報を抽出できます。また、マルチピクセルセンサーは、x-y 方向の動きや速度の検出が必要な用途に適用できます。

これらのセンサーを使用するもう一つの利点として、AFBR-S50 ファミリー内のドロップイン互換性が挙げられます。以下は、センサーを連結させることで、たとえばより遠い距離を測定する能力を維持しながら、検知 FoV を増大させることができる様子を示しています。

図 18 : センサー構成による FoV の拡大

適用要件の例：  
FoV = 12°、範囲 = 10 m



より広い FoV と最大範囲を活用するための  
センサーの継続接続 ✓

## 4 静的検出アルゴリズムと動的検出アルゴリズム

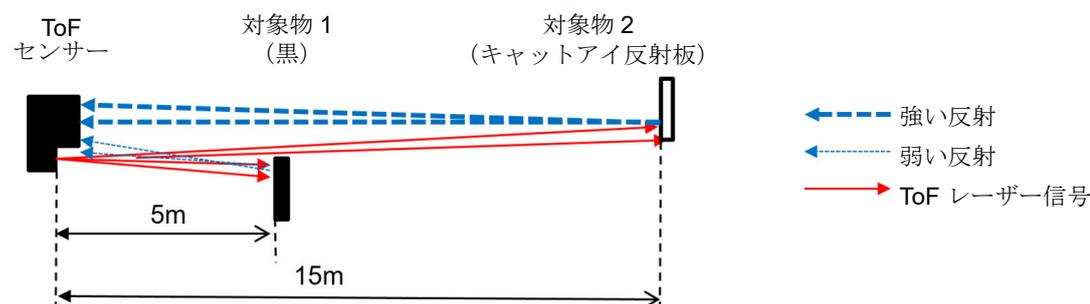
### 4.1 静的 - ピクセルビニングアルゴリズム (PBA)

実際の用途での使用を考えると、iToF センサーは、照射光スポットが背景内の実体を過度に露光してしまう状況に対処する必要があります。

後方散乱光が 2 つの異なる位置から照射されている場合、iToF の範囲にはどのような影響があるか？

次の図の状況を想定してみましょう。これは図 9 に似ていますが、センサーが異なる距離にある 2 つの対象物を同時に照射しています。反射率の低い対象物 1 (黒) はセンサーから 5m、反射率の高い対象物 2 (キャットアイ=逆反射板) は 15m の距離に配置されています。一部のビニングされたピクセルが両方からの反射光を受け、他のビニングされたピクセルが一方の対象物からの反射光だけを受けると仮定します。ビニングされたピクセルは有効とみなされ、ビニングされた範囲に寄与します。

図 19 : Tx FoV 内の 2 つの対象物



原則として、自由空間センサーが何に反応するかは、用途のさまざまな要件によって決まりますが、通常、信号強度とは無関係に、より近い対象物を示す必要があります。

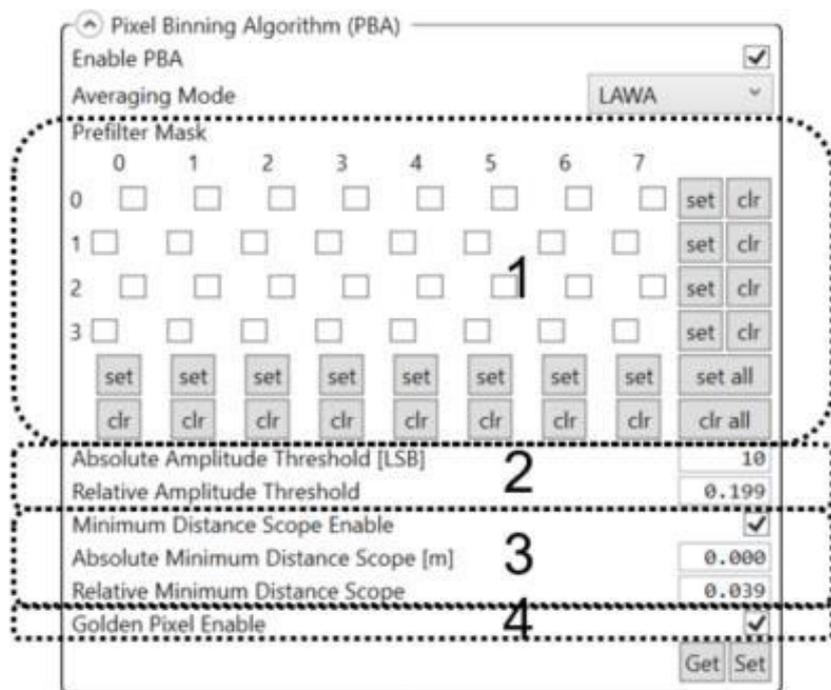
AFBR-S50 アプリケーションプログラミングインターフェース (API) は、ピクセルビニングアルゴリズム (PBA) と呼ばれるコードの一部を実装しており、AFBR-S50 ソフトウェア開発キット (SDK) の一部であるエクスプローラーソフトウェアにおいて詳細に記述されています。

PBA は、振幅 (信号強度に等しい) と距離に関して一定の要件を満たすピクセルを選択することによって、1D 範囲を決定するアルゴリズムです。さらに、最良の結果を得るためのいくつかの平均化アルゴリズムが含まれています。

ピクセルビニングフィルタリングは、以下の 4 つの連続する段階で動作します。

1. 修正されたプレフィルターマスク
  - ビニングからピクセルを除外します
2. 振幅しきい値
  - 振幅に応じてピクセルをビニング処理します (良好な信号のみを選択するため)
3. 距離範囲
  - ピクセルをその範囲に従ってビニング処理します (最も近い対象物を選択するため)
4. ゴールデンピクセル\*

図 20 : PBA - AFBR-S50 Explorer

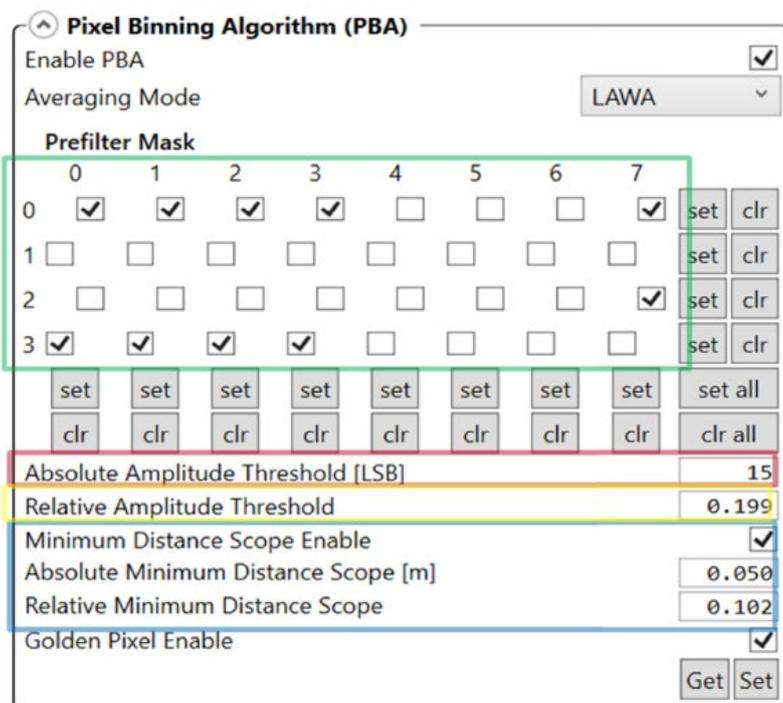


どのピクセルも振幅の要件である 2 を満たさない場合、ゴールデンピクセルが選択されます（有効な場合）。これは工場ではキャリブレーションされ、最も信号強度の高いピクセルに指定されます。

#### 4.1.1 PBA の例

以下の設定例は、ゴールデンピクセルのフォールバックソリューションなしで PBA がどのように機能するかを示しています。

図 21 : AFBR-S50 Explorer - PBA の例



注記： 実行中のエクスプローラーで、個々のパラメーターの詳細なツールチップを見ながらこの例を確認してください。

この例では、エクスプローラーソフトウェアの 1D 測定結果ボックスに、範囲、振幅、およびビンニングされたピクセル数に関する以下の値が表示されています。

図 22 : AFBR-S50 Explorer - PBA 使用例 - 1D 結果

1D Measurement Results	
Raw Range	0.847 m
Smoothed Range	0.837 m
Sigma Range	26.83 mm
Amplitude	631.3 LSB
Smoothed Amplitude	638.0 LSB
Sigma Amplitude	13.15 LSB
Pixel Count	3 Pixel

アルゴリズムはどのようにして **0.847 m** という生の範囲結果を得たか？

より深く理解するために、16 ピクセルを例とした生データのビューの一部を次の図に示します。

図 23 : AFBR-S50 Explorer - PBA の例 - 生データ

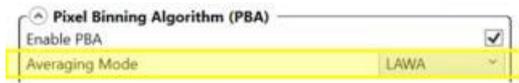
<b>Pixel (3,0)</b> Range (No Signal): = Raw: = Mean(s): 3.7524 Sigma(s): 0.2468 Amplitudes: Raw: 3.6250 Mean(s): 4.1250 Sigma(s): 0.2468	<b>Pixel (4,0)</b> Range: 0.9386 Raw: 0.9386 Mean(s): 0.9414 Sigma(s): 3.7660 Amplitudes: Raw: 91.4375 Mean(s): 91.8738 Sigma(s): 3.7660	<b>Pixel (5,0)</b> Range: 0.9520 Raw: 0.9520 Mean(s): 0.9679 Sigma(s): 11.0291 Amplitudes: Raw: 268.3750 Mean(s): 278.8175 Sigma(s): 11.0291	<b>Pixel (6,0)</b> Range: 1.0004 Raw: 1.0004 Mean(s): 0.9996 Sigma(s): 0.7201 Amplitudes: Raw: 115.2500 Mean(s): 116.5888 Sigma(s): 0.7201
<b>Pixel (3,1)</b> Range (No Signal): = Raw: = Mean(s): 20.8898 Sigma(s): 0.2191 Amplitudes: Raw: 3.3125 Mean(s): 3.1375 Sigma(s): 0.2191	<b>Pixel (4,1)</b> Range: 0.9697 Raw: 0.9697 Mean(s): 0.9499 Sigma(s): 0.4742 Amplitudes: Raw: 90.2500 Mean(s): 90.1350 Sigma(s): 0.4742	<b>Pixel (5,1)</b> ✓ Range: 0.8187 Raw: 0.8187 Mean(s): 0.8413 Sigma(s): 6.9966 Amplitudes: Raw: 489.6875 Mean(s): 492.4625 Sigma(s): 6.9966	<b>Pixel (6,1)</b> Range: 0.9744 Raw: 0.9744 Mean(s): 0.9766 Sigma(s): 13.1495 Amplitudes: Raw: 631.3125 Mean(s): 637.9950 Sigma(s): 13.1495
<b>Pixel (3,2)</b> Range: 23.4103 Raw: 23.4103 Mean(s): 15.9957 Sigma(s): 0.3527 Amplitudes: Raw: 1.4375 Mean(s): 1.0875 Sigma(s): 0.3527	<b>Pixel (4,2)</b> ✓ Range: 0.8601 Raw: 0.8601 Mean(s): 0.8477 Sigma(s): 3.4608 Amplitudes: Raw: 209.1250 Mean(s): 210.3713 Sigma(s): 3.4608	<b>Pixel (5,2)</b> ✓ Range: 0.8670 Raw: 0.8670 Mean(s): 0.8908 Sigma(s): 17.6274 Amplitudes: Raw: 536.1250 Mean(s): 546.4188 Sigma(s): 17.6274	<b>Pixel (6,2)</b> Range: 1.0122 Raw: 1.0122 Mean(s): 1.0148 Sigma(s): 1.6349 Amplitudes: Raw: 301.3750 Mean(s): 303.2738 Sigma(s): 1.6349
<b>Pixel (3,3)</b> Range (No Signal): = Raw: = Mean(s): 10.7210 Sigma(s): 0.1261 Amplitudes: Raw: 2.1875 Mean(s): 2.1088 Sigma(s): 0.1261	<b>Pixel (4,3)</b> Range (No Signal): = Raw: = Mean(s): 1.4238 Sigma(s): 0.1704 Amplitudes: Raw: 4.0625 Mean(s): 4.1588 Sigma(s): 0.1704	<b>Pixel (5,3)</b> Range: 0.7593 Raw: 0.7593 Mean(s): 0.7969 Sigma(s): 2.4229 Amplitudes: Raw: 86.8750 Mean(s): 85.2400 Sigma(s): 2.4229	<b>Pixel (6,3)</b> Range: 0.9838 Raw: 0.9838 Mean(s): 0.9822 Sigma(s): 2.2345 Amplitudes: Raw: 123.6250 Mean(s): 124.4875 Sigma(s): 2.2345

色は図 21 の PBA フィルタータイプを表しています。以下では、除外されるピクセル p(x,y) をフィルタータイプごとに列挙します。

- **プレフィルターマスク** : p(3,0)、p(3,3)
- **振幅しきい値**  
**絶対値** : p(3,1)、p(3,2)、p(4,3)  
**相対値** : p(4,0)、p(4,1)、p(6,0)、p(5,3)、p(6,3) - 相対値  
 しきい値の定義 →  $p(6,1) = 631 \times 0.199 = 125 \text{ LSB}$
- **最小距離範囲** : p(5,0)、p(6,1)、p(6,2)、しきい値の定義 →  $p(5,1) = 0.8187 \text{ m (raw)}, 0.8187 \pm 0.05 (=dx\_abs) = 0.7687 \text{ m} / 0.8687 \text{ m}, 0.8187 \pm 10.2\% (=dx\_rel) = 0.735 \text{ m} / 0.902 \text{ m}$   
 絶対値と相対値の最大範囲により、最終的なビンニングが定義されます。

3 つのピクセル p(4,2)、p(5,1)、p(5,2) が距離計算に有効なピクセルと判定されました。デフォルトでは、エクスプローラーと API が、ビンニングされたピクセル間の平均化のために、いわゆる線形振幅加重平均 (LAWA) 法を選択します。

図 24 : AFBR-S50 Explorer - PBA の例 - 平均化



$$\begin{aligned}
 Range_{binned} &= \frac{\sum Range_{raw_i} \times Amplitude_{raw_i}}{\sum Amplitude_{raw_i}} \\
 &= \frac{(0.8601 \times 209) + (0.867 \times 536) + (0.8187 \times 489)}{(209 + 536 + 489)} \\
 &= \underline{0.847 m}
 \end{aligned}$$

## 4.2 動的 - 動的コンフィギュレーションアルゴリズム (DCA)

DCA は、以下のような環境の変化に対して、発光部の信号強度と受光部の信号強度を適応させ、レーザークラス I 内の信号雑音 (SNR) 比を最適化する制御アルゴリズムです。

- 距離
- 反射率
- 周囲光

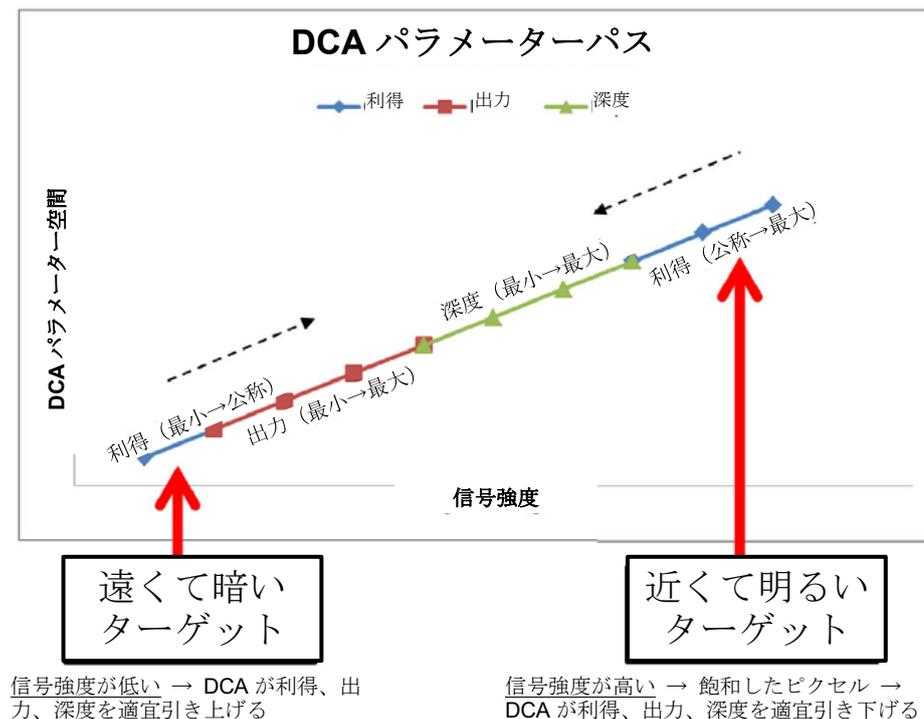
監視対象は以下のとおりです。

- 飽和ピクセル数
- 信号振幅 (強度)

次の図は、3つの主要な出力パラメーター、すなわち **利得**、**出力**、および **(積分) 深度** を使用して、検出された信号強度との関係で制御ループを描いたものです。また、DCA のパラメーター空間 (y 軸) の下側にある遠くて暗いターゲットと上側にある近くて明るいターゲットである極端な条件の DCA のエントリーポイントも示しています。このアルゴリズムは、公称値から開始され、上記の監視値に従って出力パラメーターを調整します。

**注記 :** 実行中のエクスプローラーで、個々のパラメーターの詳細なツールチップを見ながらこの例を確認してください。

図 25 : DCA - 制御図



DCA のデフォルト設定は経験的データに基づいており、センサーの種類によって異なります。内容の詳細については、AFBR-S50 Explorer の DCA ビューを参照してください。

図 26 : AFBR-S50 Explorer - DCA デフォルト設定の例

Dynamic Configuration Adaption (DCA)		
	Enable DCA <input checked="" type="checkbox"/>	
1	Saturated Px. Threshold for Lin. Decrease [#]	1
	Saturated Px. Threshold for Exp. Decrease [#]	1
	Saturated Px. Threshold for Sudden Reset [#]	7
2	Target Amplitude [LSB]	480
	Low Amplitude Threshold [LSB]	220
	High Amplitude Threshold [LSB]	1000
3	Nom. Integration Depth [#Pattern]	4
	Min. Integration Depth [#Pattern]	0.06
	Max. Integration Depth [#Pattern]	16
	Nom./Max. Laser Modulation Current [mA]	54.6
	Min. Laser Modulation Current [mA]	7.1
	Nom. Gain Setting [1]	MediumHigh
Min. Gain Setting [1]	Low	
4	Max. Gain Setting [1]	High
	Power Saving Ratio [%]	19.9
	Get Set	

各項目の説明は、以下のとおりです。

1. 積分エネルギーを減少させるためのしきい値で定義された飽和ピクセル数。

**注記：** この設定により、環境条件が変化したときの反応速度も定義されます。

2. 制御ループの入力パラメーターとしての振幅値

3. 補正パラメーターである深度、出力、利得

4. 1 フレームあたりのデバイスの最小アイドル時間

**注記：** この設定では、デジタル積分のコストに対して消費電流が小さくなります。

DCA からの積分深度は、これによりレーザーパターンの繰り返し回数が定義されるため、さらにアナログ積分として定義されます。また、デジタル積分は、取得した位相の平均サンプル数を表します。どちらのタイプも最終的な積分時間に寄与します。デジタル積分は、レーザークラス I の範囲内で最も低い再現性ノイズを実現するように DCA によって自動的に設定されます。

#### 4.2.1 DCA の例

この例も AFBR-S50 Explorer で実行されており、DCA の制御メカニズムをより詳細に表しています。次の図の DCA 設定がセンサーに適用されています。

図 27 : AFBR-S50 Explorer - DCA の例 - 設定

Dynamic Configuration Adaption (DCA)	
Enable DCA	<input checked="" type="checkbox"/>
Saturated Px. Threshold for Lin. Decrease [#]	1
Saturated Px. Threshold for Exp. Decrease [#]	1./ 2. 3
Saturated Px. Threshold for Sudden Reset [#]	16
Target Amplitude [LSB]	3. 800
Low Amplitude Threshold [LSB]	350
High Amplitude Threshold [LSB]	1600
Nom. Integration Depth [#Pattern]	4
Min. Integration Depth [#Pattern]	0.06
Max. Integration Depth [#Pattern]	16
Nom./Max. Laser Modulation Current [mA]	54.6
Min. Laser Modulation Current [mA]	7.1
Nom. Gain Setting [1]	MediumHigh
Min. Gain Setting [1]	Low
Max. Gain Setting [1]	High
Power Saving Ratio [%]	19.9
<input type="button" value="Get"/> <input type="button" value="Set"/>	

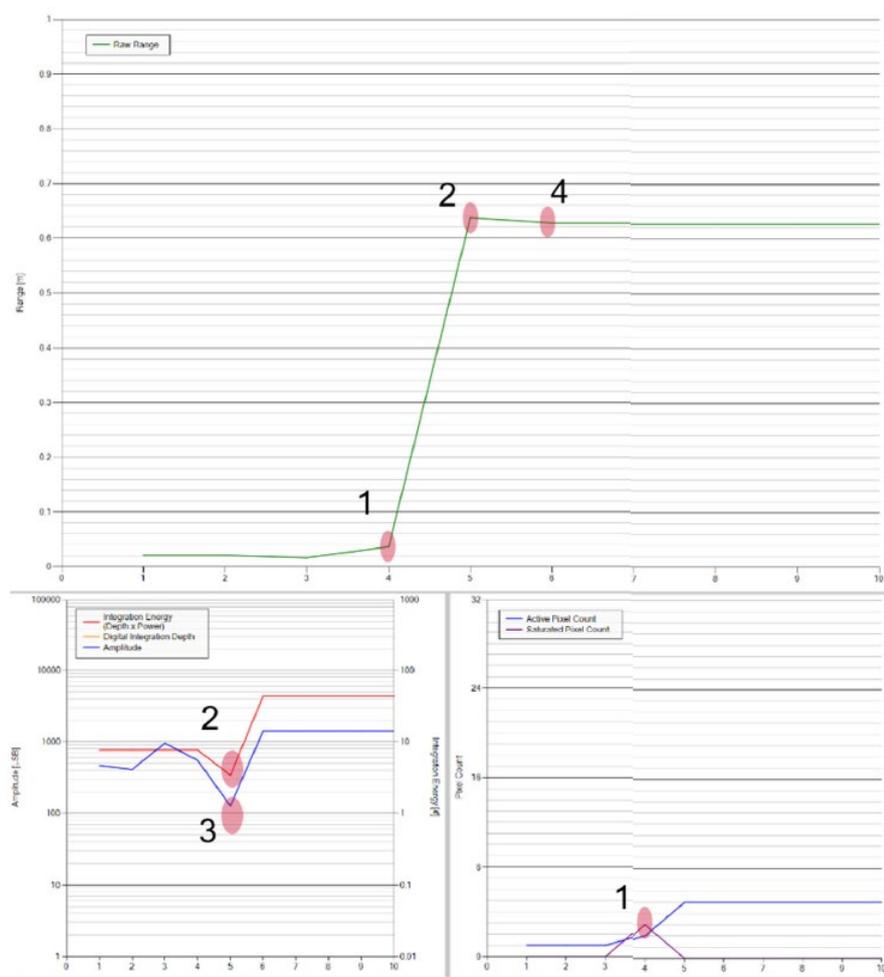
また、デバイスは 1 Hz のフレームレートを使用しており、1D プロットの X 軸の最大値は 10 に設定されています。例を単純化するため、DFM をオフにし、単一の変調周波数を使用しました。近くの対象物がセンサーの FoV から突然消えるという状況をシミュレートしています。

#### 発生順序：

1. フレーム 3-4 : 飽和ピクセル数がしきい値 3 を超えています。
2. フレーム 4-5 : 積分エネルギー（深度×出力）が半減します。
3. フレーム 5-6 : 低振幅しきい値 350 LSB 未満の振幅⇒積分エネルギー（深度×出力）が適宜増大し、少なくとも目標振幅 800 LSB に達します。
4. フレーム 6 : 最終的な距離には、3 フレーム後に到達します。

すべてのステップとその具体的な番号は、以下の図でも確認できます。

図 28 : AFBR-S50 Explorer - DCA の例 - 1D プロット



AFBR-S50 iToF センサーの評価と実装を容易にするために、AFBR-S50 Explorer の可視化ビューで作業を開始します。

## 5 目に対するレーザーの安全性

動的コンフィギュレーションアルゴリズム (DCA) は、レーザークラスを維持することで SNR を高く保ちます。AFBR-S50 センサーのデータシートを読むと、センサー自体がレーザークラス I の範囲内に指定されているにもかかわらず、発光部の本来のレーザークラスは 3B に指定されていると記されていることから読者は不安になるかもしれません。

このセクションでは、データシートの追加情報として、レーザークラス I が動作中にどのように保証されるかについての詳細情報を提示します。

以下に基本的な安全確保についてまとめます。

- すべての計算の根拠：IEC 60825-1, Ed. 3.0 2014-5。
- レーザークラス 1 の動作は、iToF ASIC と API の両方によって、与えられたフレームレートに基づきフレームごとの積分時間を適宜調整することで保証されます。
- 光平均出力はデバイスごとに工場でのキャリブレーションされています。
- iToF ASIC は、少なくとも 20% の余裕をもってバースト出力要件を満たすために、バーストに一時停止時間を加えます。これは、所定のコンフィギュレーションに基づいて、ハードウェアにより自動的に行われます。
- AFBR-S50 API では、レジスターへの直接アクセスが遮断されているため、レーザークラスタイミングのオーバーライドはできません。

## 5.1 動作中のハードウェアで実施される安全対策

以下は、ハードウェアにより実施される安全対策です。

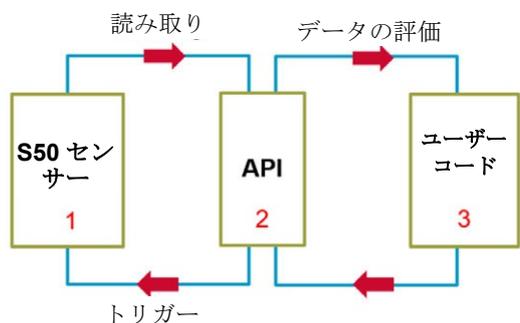
- 標準動作 (API を使用)
  - 2%未満の低デューティサイクルのレーザーパターンが使用されます。
  - ソフトウェアの誤動作に左右されないハードウェアタイマーが使用されます。
- ASIC の欠陥 (ESD や EOS など) による動作
  - ASIC は、トリガーが失われるたびに動作を停止するように設計されています。トリガー信号が発生しなければ、パルス (パターン) も連続波もレーザー放射されません。
  - さらに、850 nm レーザーモジュールの場合、使用される最大ピーク電流は、実装されているレーザードライバの最大電流です。ピーク電流を増大させることはできません。
  - 何らかの理由で、ある欠陥によりレーザードライバ回路から連続波出力が発生する場合、発光部側の光出力を監視している基準ピクセルは、許容出力を超えた場合に連続波出力を検出できます。

## 5.2 動作中にソフトウェアに実装される安全対策

ソフトウェアにより実施される安全対策は以下のとおりです。

- 標準動作 (API を使用)
  - DCA が積分深度とレーザー電流を調節した後、各フレームの後に目の安全チェックが行われます。
    - 積分深度、レーザー電流、およびフレームレートの積は、初期のデフォルト設定を基準として一定に保たれます。
  - 目の安全性に関連するパラメーター調整は、DCA の保護下でのみ可能です。そのため、誤ってレーザークラス 3B でレーザーを放射する設定を行ってしまうことはあり得ません。
  - シングルスレッドアーキテクチャ

図 29 : AFBR-S50 API のシングルスレッドアーキテクチャ



- ソフトウェア/ハードウェア異常時の動作
  - ソフトウェアクラッシュ、ハング、または遅延により、ASIC のトリガー (図 29 を参照) は失われ、ASIC の動作が停止します。
  - ソフトウェアのハングや遅延が発生した場合、測定はトリガーされず、データバッファが評価されソフトウェアから消去されるまで延期されます。
  - 基準ピクセルの警告フラグは、レーザークラス違反をシステムに知らせます。
  - SPI 通信：通信中に散発的なビットエラーが発生します。
    - DCA パラメーターの目の安全性チェックは各フレームの後に行われ、あるフレームにおける散発的なビットエラーは次のフレームで解消されます。
  - SPI 通信：通信中にビットエラーが多発します。
    - タイムアウトメカニズムによりフレームが開始されません。

## 6 アプリケーションプログラミングインターフェース

このセクションでは、ソフトウェア開発キット (SDK) の一部である Argus API とも呼ばれる AFBR-S50 アプリケーションプログラミングインターフェース (API) の概要を紹介します。

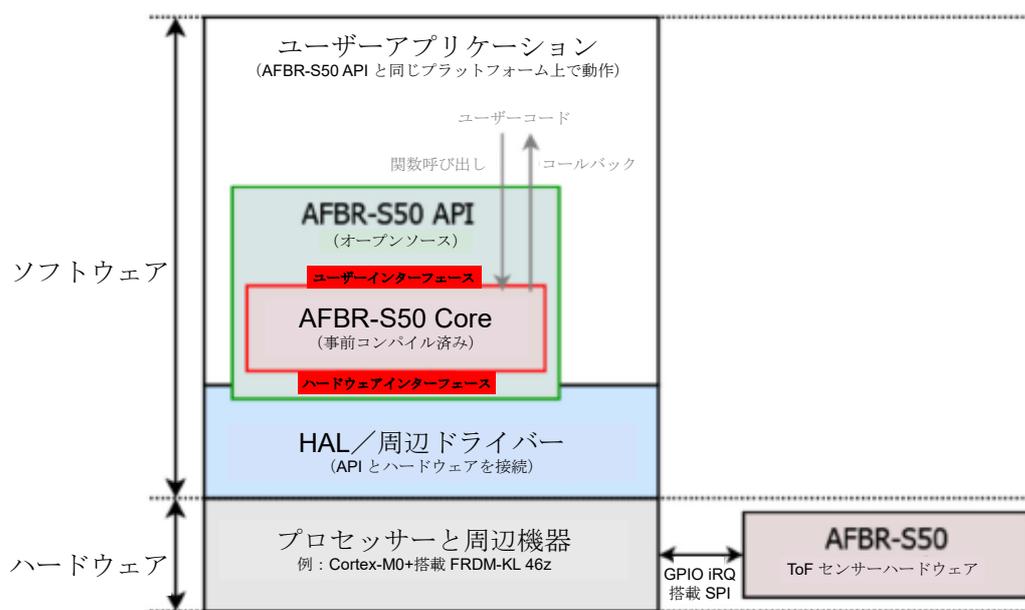
## 6.1 概要

Broadcom の AFBR-S50 センサーモジュールにはマイクロコントローラー (MCU) が実装されていないため、エンドユーザーはセンサーのコストを削減でき、シリアルペリフェラル インターフェイス (SPI) を介して Arm Cortex-M シリーズプロセッサに自由に接続できるほか、IRQ 処理用に GPIO を 1 つ追加できます。

図 30 に示すとおり、API 自身は事前コンパイルされた Core ライブラリーをカプセル化しており、このライブラリーがデバイスの安全な動作のためのレジスターへの直接アクセスを処理します。実装者は、最も一般的な Cortex-Mx アーキテクチャ用の複数の事前コンパイル済みライブラリーから希望のものを選択できます。

シームレスな実装を実現するため、AFBR-S50 API には、ユーザーアプリケーションと関数呼び出しやコールバックを介して通信するためのソフトウェアインタフェースと、MCU や他の周辺機器とハードウェア抽象化レイヤー (HAL) を介して通信するためのハードウェアインタフェースが備わっています。

図 30 : ユーザーアプリケーションへの統合のための AFBR-S50 SDK アーキテクチャ



デフォルトでは、HAL のコードは評価キットの FRDM-KL46z を参照しており、必要に応じて他の MCU プラットフォームに移植する必要があります。まずは、ステップバイステップ形式の移植ガイドをダウンロードしてください (セクション 8 参考文書を参照)。

次の図は、API を介してアクセス可能なモジュールの概要を示しています。

図 31 : AFBR-S50 API モジュール

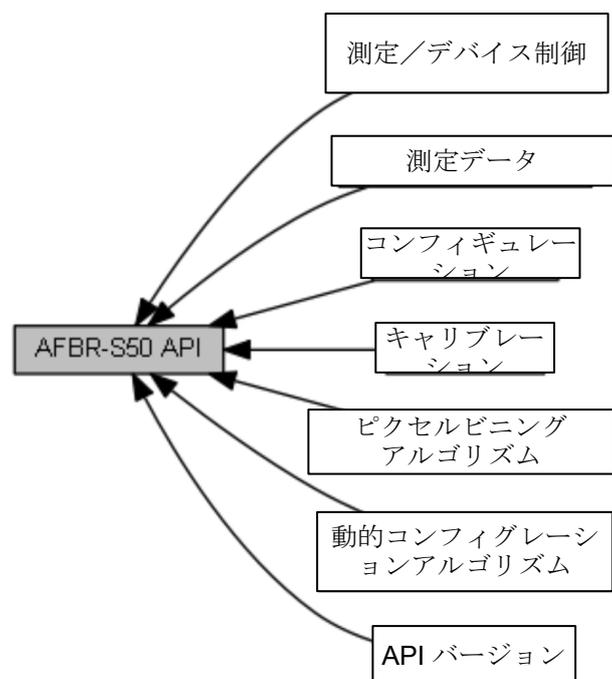


表 4 : モジュール

モジュール	説明
測定/デバイス制御	測定の開始と停止、データの評価、ステータスの取得、キャリブレーションのための機能の実行など。
測定データ	単一ピクセルのステータスおよび測定データ、ビニングされた範囲および振幅の結果など。
コンフィギュレーション	フレーム時間、測定モードなどの設定。
キャリブレーション	キャリブレーションデータ（たとえば、xtalk、範囲オフセットなど）の取得と設定。
ピクセルビニングアルゴリズム (PBA)	PBA 設定の取得と設定。
動的コンフィギュレーションアルゴリズム (DCA)	DCA 設定の取得と設定。
API バージョン	API のバージョン情報の取得。

## 6.2 EEPROM データ

iToFASiC には、チップ ID や工場キャリブレーションのデータなど、デバイス固有の情報を格納した EEPROM が実装されています。デバイス固有のレジスタ設定を調節してセンサーに適用するために、このデータがモジュールの初期化中に一度だけ読み出されます。この EEPROM の内容には、SPI ピンを使ってアクセスすることもできますが、GPIO モードにして、独自のプロトコルに従ってピンをトグルする必要があります。

## 6.3 必要最小メモリー

- RAM : 8 kB (4 kB ヒープ + 4 kB スタック)
- ROM/フラッシュメモリー : 128 kB

詳細については、API リファレンスマニュアルを参照してください。このマニュアルは、AFBR50 Explorer のヘルプセクションからアクセスでき、以下のディレクトリーの SDK のインストールパスにも保存されています。

<root>¥AFBR-S50SDK¥Device¥Manual¥AFBR-S50 API Ref. Manual.pdf

## 7 よくある質問

### 7.1 Broadcom の iToF センサーを使用するにはどうすればよいですか？

最も簡単な方法は、AFBR-S50 評価キットをご購入いただくことです（[セクション 8 参考文書](#)のリンクを参照）。この評価キットでは、1 行のコードもプログラミングすることなく、すぐにセンサーを使い始めることができます。SDK のユーザーガイドとわかりやすいグラフィカルユーザーインターフェースにより、Broadcom の iToF センサーの性能を確認するための包括的な情報とツール群を利用できます。

### 7.2 AFBR-S50 センサーの FoV とは何ですか？センサーが使用するピクセル数はいくつですか？

一般的に、すべての AFBR-S50 センサーの受信側には、32 個のピクセルがあります。ただし、使用されるピクセルの数は、主に放射ビームが発散されるモジュールの種類に依存します。詳細は、[セクション 3.4 視野 \(FoV\)](#) を参照してください。

### 7.3 レーザークラス I での動作はどのように保証されますか？

詳細は、[セクション 5 目に対するレーザーの安全性](#)を参照してください。

### 7.4 iToF センサーの総合的な性能に影響を与えるのは何ですか？

1. 距離 D : 信号強度約  $1/D^2$
2. 対象物／ターゲットの反射率：
  - 逆反射体（たとえばキャットアイ）：信号強度×係数約 1（100%）
  - 白い対象物：信号強度×0.8 超の係数（80%）
  - 黒い対象物：信号強度×0.15 未満の係数（15%）
3. 周囲条件：

太陽光は、受信側のショットノイズを増大させ、感度の低下を招きます。約 100 kLux（AM1.5）の太陽光に暴露すると、最大範囲が 50%減少します。

### 7.5 なぜ PBA でプレフィルターマスクを使うのでしょうか？

たとえば、センサーが固定寸法の開口部で覆われており、いくつかの境界ピクセルに強い振幅を発生させる既知の避けられない反射があり、それが最終的なビニング範囲に影響する場合には、時にビニングからピクセルを除外する必要があります。正しいプレフィルターマスクを使用することで、それらのピクセルを最終的な範囲計算から除外できます。

### 7.6 AFBR-S50 API をプロジェクトに実装するにはどうすればよいでしょうか？

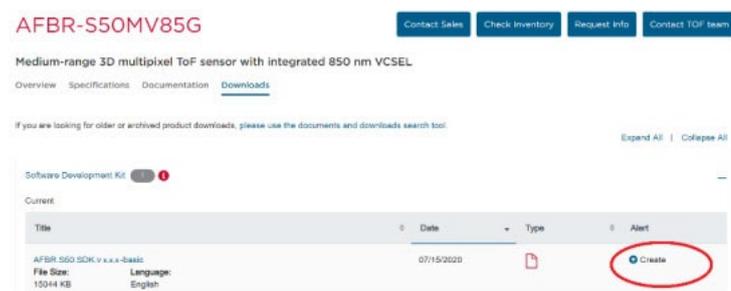
AFBR-S50 Core ライブラリーは静的 ANSI-C ライブラリーファイル（lib\*.a）形式で提供され、対応する API は ANSI-C ヘッダーファイル（\*.h）形式で提供されます。ライブラリーをリンクするようにリンカーを設定した後で、/include フォルダにあるメインヘッダー、argus.h を格納します。詳細については、API リファレンスマニュアルを参照してください。このマニュアルは、AFBR-S50 Explorer のヘルプセクションからアクセスでき、以下のディレクトリーの SDK のインストールパスにも保存されています。<root>¥AFBR-S50SDK¥Device¥Manual¥AFBR-S50 API Ref. Manual.pdf

### 7.7 SDK の新しいバージョンがダウンロード可能かどうかはどうすればわかりますか？

Broadcom のホームページ（[www.broadcom.com](http://www.broadcom.com)）には、登録されたダウンロードの新バージョンが利用可能になるたびに登録ユーザーに通知するアラートシステムが実装されています。

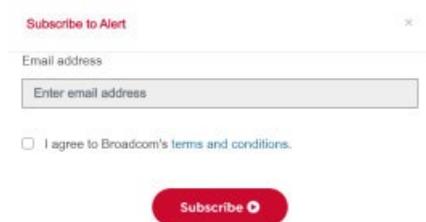
1. iToF センサーまたは評価キットのダウンロードセクションに入り、ハイライトされた **Create** ボタンをクリックします。

図 32 : Create ボタン



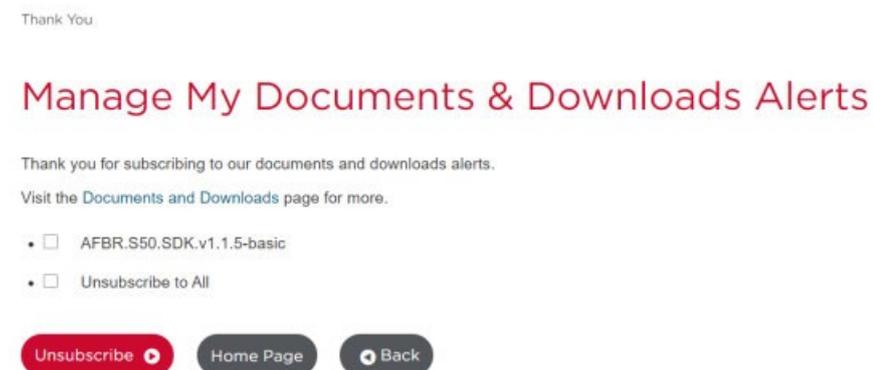
2. アラート受信を申請します。

図 33 : Subscribe ボタン



3. アラート受信申請の確認と概要を確認します。

図 34 : マイドキュメントとダウンロードのアラートの管理



## 8 参考文書

参考文書名	文書種別	リンク
AFBR-S50MV85G センサー	データシート	<a href="https://docs.broadcom.com/docs/AFBR-S50MV85G-DS">https://docs.broadcom.com/docs/AFBR-S50MV85G-DS</a>
AFBR-S50MV85I センサー	データシート	<a href="https://docs.broadcom.com/docs/AFBR-S50MV85I-DS">https://docs.broadcom.com/docs/AFBR-S50MV85I-DS</a>
AFBR-S50LV85D センサー	データシート	<a href="https://docs.broadcom.com/docs/AFBR-S50LV85D-DS">https://docs.broadcom.com/docs/AFBR-S50LV85D-DS</a>
AFBR-S50MV68B センサー	データシート	<a href="https://docs.broadcom.com/docs/AFBR-S50MV68B-DS">https://docs.broadcom.com/docs/AFBR-S50MV68B-DS</a>
AFBR-S50 評価キットスタートガイド	ユーザーガイド	<a href="https://docs.broadcom.com/docs/AFBR-S50-EK-UG">https://docs.broadcom.com/docs/AFBR-S50-EK-UG</a>
AFBR-S50 API サンプル移植ガイド	プログラミングガイド	SDKは <a href="https://docs.broadcom.com/docs/12398582">https://docs.broadcom.com/docs/12398582</a> からダウンロードできます。
AFBR-S50 基準設計	アプリケーションノート	<a href="https://docs.broadcom.com/docs/AFBR-S50-RD-AN">https://docs.broadcom.com/docs/AFBR-S50-RD-AN</a>

## 改訂履歴

バージョン **1.0** 2021 年 2 月 10 日

- 初版。

