



直接ToFによる深度センシングのリファ レンス設計

直接ToFによる深度センシングのリファレンス設計

深度センシングの概要

正確な測定が可能な深度センシングは、産業、民生、車載など、今日の市場で多くのアプリケーションに必要とされています。オンセミは、一連の深度センシングのリファレンス設計と評価キットを設計しました。これにより、多様な市場向けの深度センシングソリューションを迅速に開発し、市場投入までの時間を短縮することができます。

深度センシングには、多種多様な方法があります。例えば、標準的なCMOSイメージセンサを使用する方法としては、ステレオ三角測量、位相差検出ピクセル、構造化光などがあります。

Stereo Triangulation | Example: Intel RealSense, Subaru EyeSight



Figure 1. Stereo Triangulation

距離は、異なる2台のカメラで受けた光の三角測量から求められます。カメラで撮影した画像間の物体位置の視差を比較することにより、物体までの距離を計算できます。

• 長所

- パッシブ法
- 標準のイメージセンサ

• 短所

- 2台のカメラが必要
- 最大距離がカメラ間の距離に依存
- 照明条件に大きく依存
- 計算コストが大

- 適したアプリケーション
 - 低コスト深度カメラ
 - 屋内 – 短距離アプリケーション

Phase Detection Pixels | Example: iPhone Camera AutoFocus

Single sensor Pixel level
phase difference to create
depth mapping

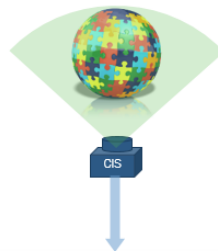


Figure 2. Phase Detection

距離は、1台のカメラで撮影したシーン内の各点に対して取得されます。ピクセルレベルのイメージセンサが、異なる位置を遮光したピクセルペアで受けた光の位相差を使用するか、同じマイクロレンズ下の複数のフォトダイオードを使用して深度を計算します。

- 長所
 - パッシブ法
 - 標準のイメージセンサ
- 短所
 - 深度の分解能が劣る
 - 照明条件に大きく依存
 - 計算コストが大
 - 短距離
- 適したアプリケーション
 - スマートフォンのオートフォーカス

Structured light | Example: iPhone Face ID

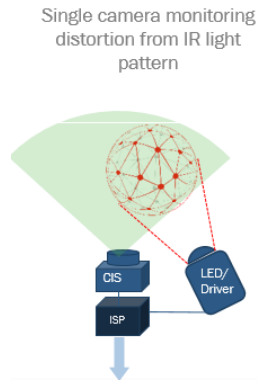


Figure 3. Structured Light

従来のCMOSイメージセンサを搭載したカメラで赤外光のパターンを受けて解析し、その歪みを利用してシーン内の深度を計算します。

パターンの歪みを使用して物体の3次元形状を求めます。

- 長所
 - 短距離に適している
- 短所
 - アクティブ法
 - 周囲光の影響を受けやすい
 - 深度の誤差が距離とともに増加
 - 長距離には不適
- 適したアプリケーション
 - 顔認識

LiDAR

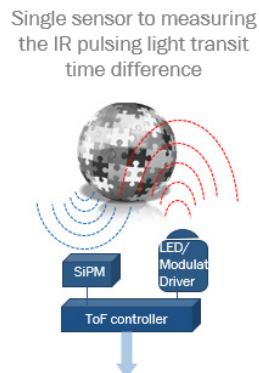


Figure 4. LiDAR

光による検出および測距(LiDAR : Light Detection and Ranging)では、深度と角度の分解能が高いことから、他の手法よりも優れた深度センシングが可能です。また、赤外光の光トランスミッタとレシーバを用いたアクティブな手法のため、あらゆる照明条件で動作します。LiDARは、多種多様な市場で、車載、産業、ロボット、民生向けの拡張現実(AR)や仮想現実(VR)などの様々なアプリケーションや用途に広く配備されています。

LiDARは、一般に直接Time of Flight (dToF)測定技術を指し、送信した信号からその反射光までの時間の遅れを計算します。もう1つの手法は、間接ToF(iToF)です。どちらの手法でも、パルス変調または連続変調を使用できます。

iToFでは、限られた数(通常は2つ)のビンに多数の光パルスを蓄積するイメージセンサピクセルの変調を利用します。戻ってきたパルスのタイミングは、異なるビンの電荷を測定することによって決定されます。

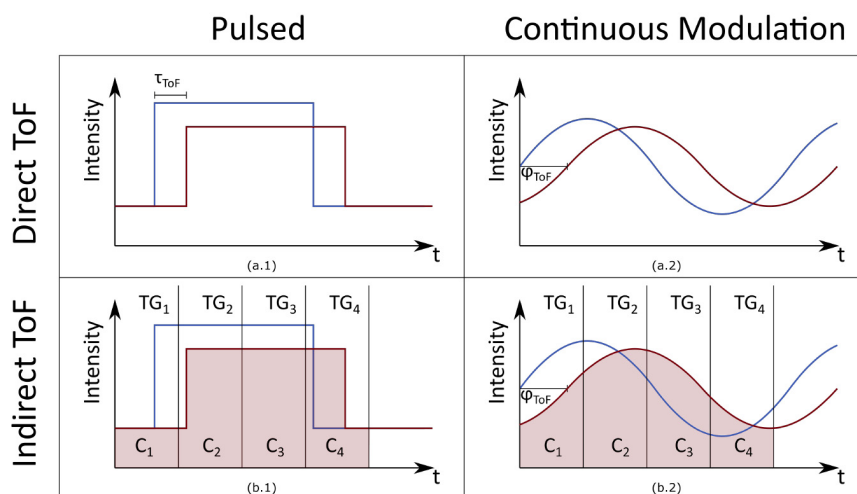


Figure 5. Direct & Indirect ToF Methods

Table 1. TOF METHOD COMPARISON

Parameter	iToF	dToF
Acquisition Speed	Long Integration Time	Fast Acquisition
Range Ambiguity	Yes	No
Detect Multiple Echoes	No	Yes
Pixel Count	Large	Smaller
Data Volume	Small	Larger
Operation in Strong Ambient Light	OK	Good

iToFは、短距離の深度センシングアプリケーションや、屋内環境および日光がセンサに直接入射しない環境での使用に適しています。

dToFは、短距離と長距離どちらの深度センシングアプリケーションにも適しています。取得レートがより速く、複数の反射光を測定できるため、リターンパス内にある複数の物体を検出できます。

本稿では以降、パルスdToF法に焦点を当てて説明します。この手法は、1回の測定によって、あるいは読み取りごとに複数の測定値を蓄積することによって実現できます。

シングルショットモードでは、タイマの始動時にトランスミッタから短いレーザパルスを発射します。レーザパルスがLiDARシステムの視野内の物体に当たると、反射して戻ってきます。戻ってきたパルスをレシーバで検出し、タイマを停止します。この時間差の1/2に光速を掛けると、検出した物体までの距離をメートル単位で求めることができます。

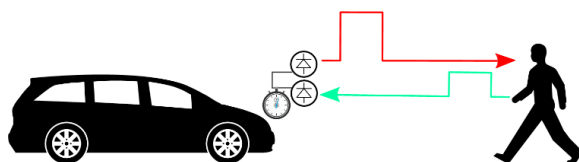


Figure 6. Single Shot Mode

ワーストケースの対象物は、黒い服を着ている歩行者など、遠くにある低反射率の物体です。この場合、戻ってきたレーザパルスを、周囲光から来る光子などのノイズ源を超えて識別することが困難な場合があります。より強力なレーザを使えば、この限界を克服できる可能性はありますが、レーザの最大出力はIEC-60825-1に記載される眼の安全限界の範囲内に制限する必要があります。

マルチショットモードでは、検出したレーザパルスのタイムスタンプのヒストグラムを作成することにより、LiDARシステムの信号対ノイズ比(SNR)が向上します。このヒストグラムを使用して、物体の距離を抽出できます。この方法により、システムが検出できる最大深度を延ばすことができます。

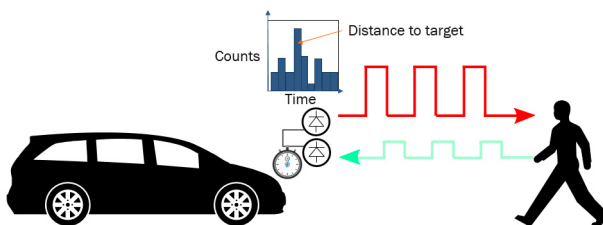


Figure 7. Multi-shot Mode

このモードでは、1つ1つの単一光子の検出イベントは、時間に対応付けられます。得られたヒストグラムには、周囲の光子などのノイズ源からのノイズレベルが含まれますが、シ

ーン内の実際の物体からは、ほぼ同じ時刻により多くの戻り光があるため、ヒストグラム中に対象物までの距離を与える明確なピークができます。

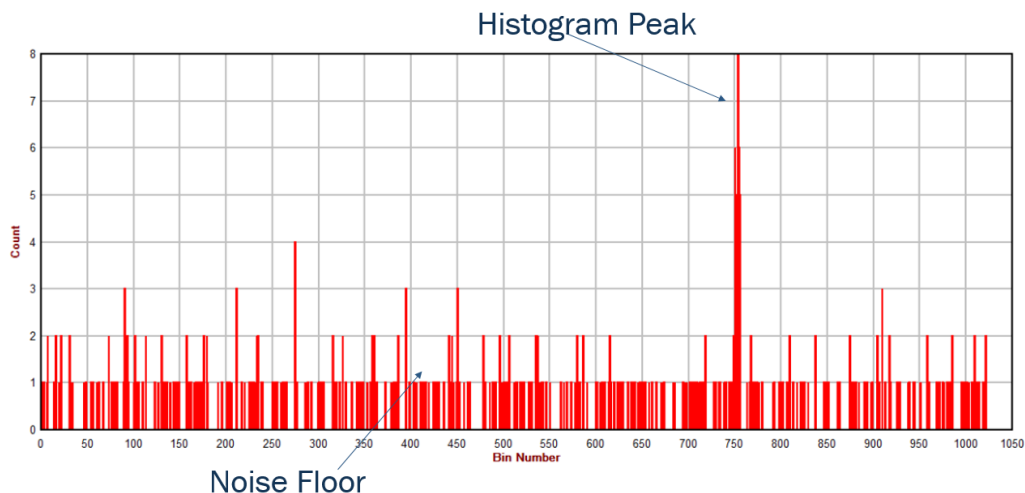


Figure 8. Histogram Peak

前述した方法を検討する上では、LiDARシステムのパフォーマンスには高感度センサが不可欠ということは明らかです。dToF LiDARシステムに使用する一般的なセンサの例をFigure 3に示します。PINダイオードとアバランシェフォトダイオード(APD)は、入ってくる光の量に比例した出力を与えるリニアモードの検出器です。物体の反射として対応付けられるスレッシュホールドに達するまで、光子をある程度蓄積する必要があります。これら従来の検出器は、より高性能のセンサに急速に置き換えられつつあります。そのようなセンサは、単一光子アバランシェフォトダイオード(SPAD)上に構築されており、光子1個に対しても感度があります。これらのセンサの例としては、シリコンフォトマルチプライヤ(SiPM)、SiPMアレイ、SPADアレイなどがあります。オンセミでは、これらの製品をCMOSプロセスで製造しているため、デバイス間の均一性に優れ、低電圧動作が可能で、非常に高いゲインを備えています。これらのセンサの特徴は、低コストで高性能なLiDARの大量生産に適しています。

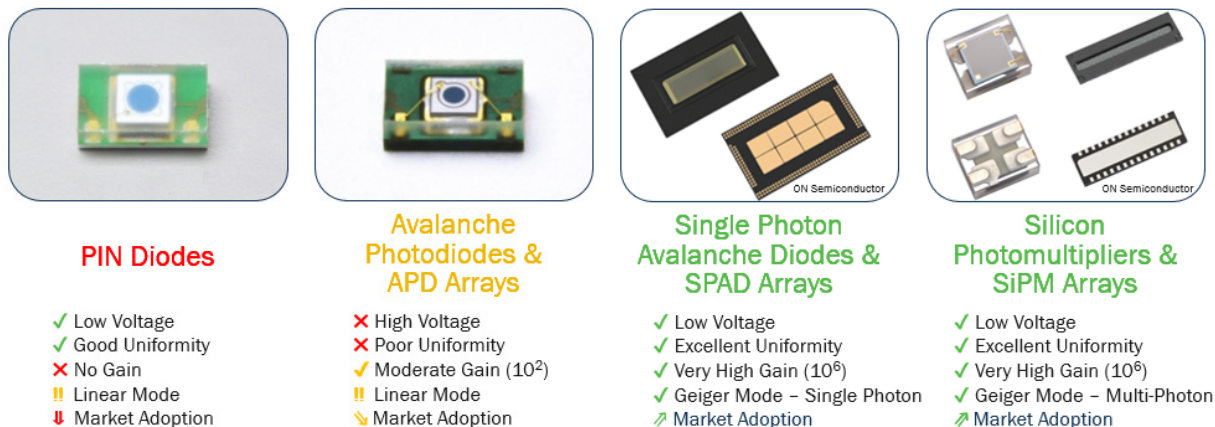


Figure 9. dToF Sensors

ここまでに概要を述べた理論は、シングルポイントLiDARシステムについて説明したものです。これは、単一の点に対しては効果的な測距ツールとなります。しかし、同じアーキテクチャをスキャニングオプトエレクトロニクスシステムと組み合わせることで、光ビームの方向を制御し、シーンの深度の高密度な点群(ポイントクラウド)を形成することができます。また、スキャニングシステムにより、レーザ出力をより効率的に使用できるようになりますが、機械的な回転装置で構成されるため大型になり、コストが高くなります。これらの機械的なビーム方向制御システムは、微小電気機械システム(MEMS)のミラー、液晶メタ表面(LCM)、光フェーズドアレイ(OPA)などの微小システムへの置き換えが始まっています。

また、センサアレイと発光素子アレイを併用してシーンをフラッシュ(一度に捕捉)することにより、ビーム方向制御を使わずに高密度の点群を得ることもできます。フラッシュベースのLiDARは、SiPMやSPADの大規模アレイとともに使用し、真のソリッドステートソリューションを作ることができます。フラッシュLiDARは、近距離から中距離のアプリケーションに適しています。レーザ出力がシーン全体に分散することと、眼の安全要件によりセンサの視野内の各点に入射する放出光子の量が制限されているためです。

スキャニング方法の例を下図に示します。

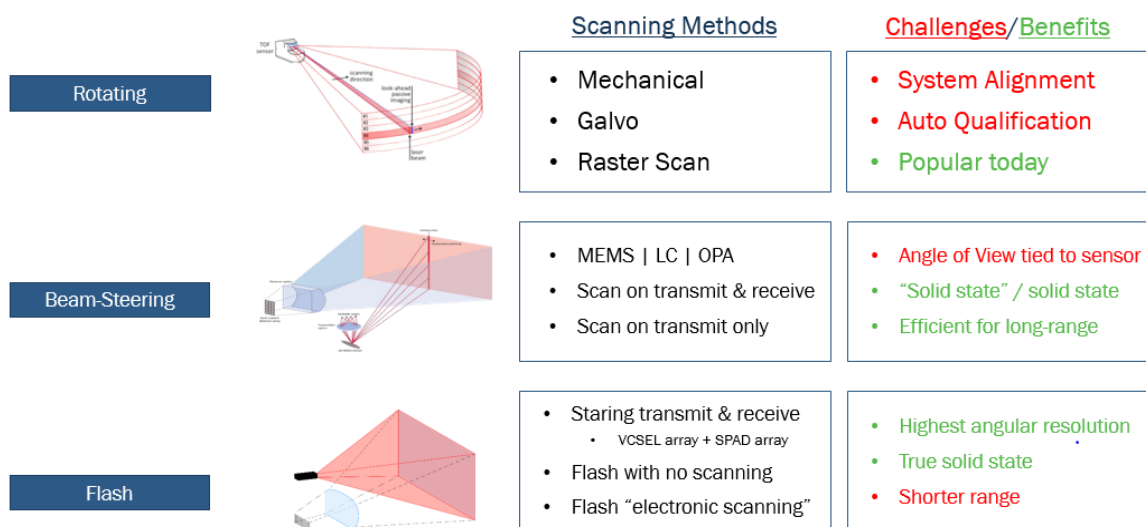


Figure 10. Beam Steering Methods

オンセミのLiDARリファレンス設計

光子が戻ってくると、LiDARシステムのシグナルチェーンは、アナログ-デジタルコンバータ(ADC)または時間-デジタルコンバータ(TDC)のいずれかを使用して、検出したレーザの反射光をデジタル化することができます。ADCベースのシステムでは、パルス全体のデジタル化が可能で、パルスの形状から推測できる反射率など、対象物に関する付加情報を得ることができます。しかし、TDCベースの方法には、コストと消費電力の面で利点があ

ります。その理由は、弁別回路を比較的簡単に実装でき、この手法が狭いパルス幅のレーザに適しているからです。そのため、眼の安全限界に影響を与えることなく、パルスごとにより高いピーク出力を使用できることとなります。

本稿で紹介するリファレンス設計は、深度の抽出にマルチショットのヒストグラム出力を用いるTDC信号処理手法に基づきます。これらは、LiDARエコシステムのお客様やパートナーが、オンセミの製品とシステムソリューションを活用して、独自の設計を構築できるように開発されたものです。

SiPM dToF LiDARリファレンスプラットフォーム

SiPM dToF LiDARリファレンスプラットフォームは、オンセミによる完全なリファレンス設計でもあり購入いただくことができます。これはシングルポイントLiDARシステムのターンキーソリューションに近いもので、レーザ発振器、光学系、センサ、1 mから23 mまでの深度を測定するためのFPGAのコードを含む読み出し受信チェーンで構成されています。

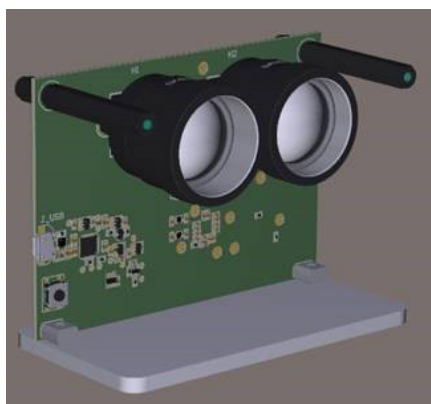


Figure 11. SiPM dToF LiDAR Reference Platform

トランスミッタは、OSRAMの905 nmレーザダイオードSPL PL 90_3を使用し、対象物にレーザパルスを発射します。送信レンズ内には、リファレンスSiPMとしてMicroRB-10010-MLP-TRを使用し、出射レーザパルスを検出して、TDCの開始信号を生成します。

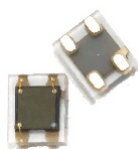


Figure 12. RB-Series SiPM Sensor

レシーバには、第2のSiPMとしてMicroRB-10010-MLP-TRを使用し、対象物からの反射パルスを検出します。増幅段により、低輝度の反射レーザパルスを確実に検出できます。アンプの出力はTDCの停止信号を供給します。

TDCはFPGA内に実装され、開始信号と停止信号にタイムスタンプを付加するために使用されます。FPGA上でヒストグラム処理が行われ、所定の対象物までの深度が計算されます。

SiPM dToF LiDARリファレンスプラットフォームには、グラフィカルユーザインタフェースが含まれています。これにより、ユーザはヒストグラムのデータを表示したり、レーザ距離計をシングルショットまたはマルチショットモードに設定することができます。また、バイアス電圧を変更してSiPMの感度を設定することもできます。

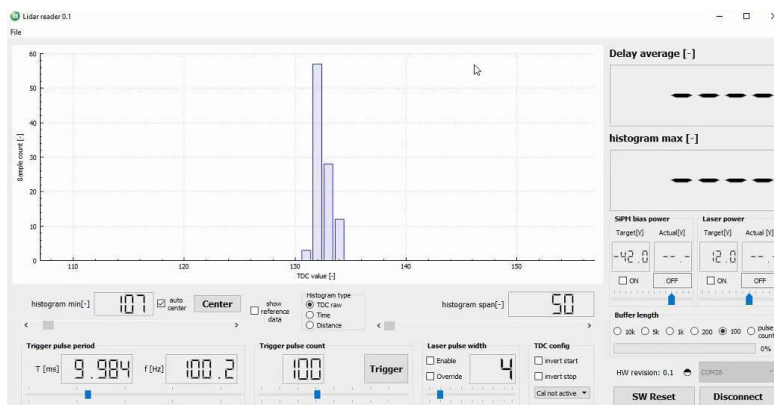


Figure 13. User Interface showing Depth Histogram



Figure 14. SiPM dToF LiDAR Reference Platform

このLiDARリファレンスプラットフォームは、オンセミのIoTプラットフォーム内の他のセンサに接続するように構成することができます。

SiPM dToFリファレンスプラットフォームには、以下のものが含まれます。

- 評価キット
 - SiPM dToF LiDARリファレンスプラットフォーム
 - ユニバーサル電源とケーブル
 - ソフトウェアGUI

- リファレンス設計のドキュメント
 - 設計の詳細な説明
 - 実装に関するアドバイス
 - インタフェースコマンドライブラリ
- パッケージのリリース
 - FPGAのコード
 - Gerberファイル
 - Cadenceファイル
 - Eagleファイル
 - 完全なBOM

当社のSiPM dToF LiDAR リファレンスプラットフォームの詳細は、depthsensing_questions@onsemi.com にお問い合わせください。

16チャンネルLiDARリファレンス設計

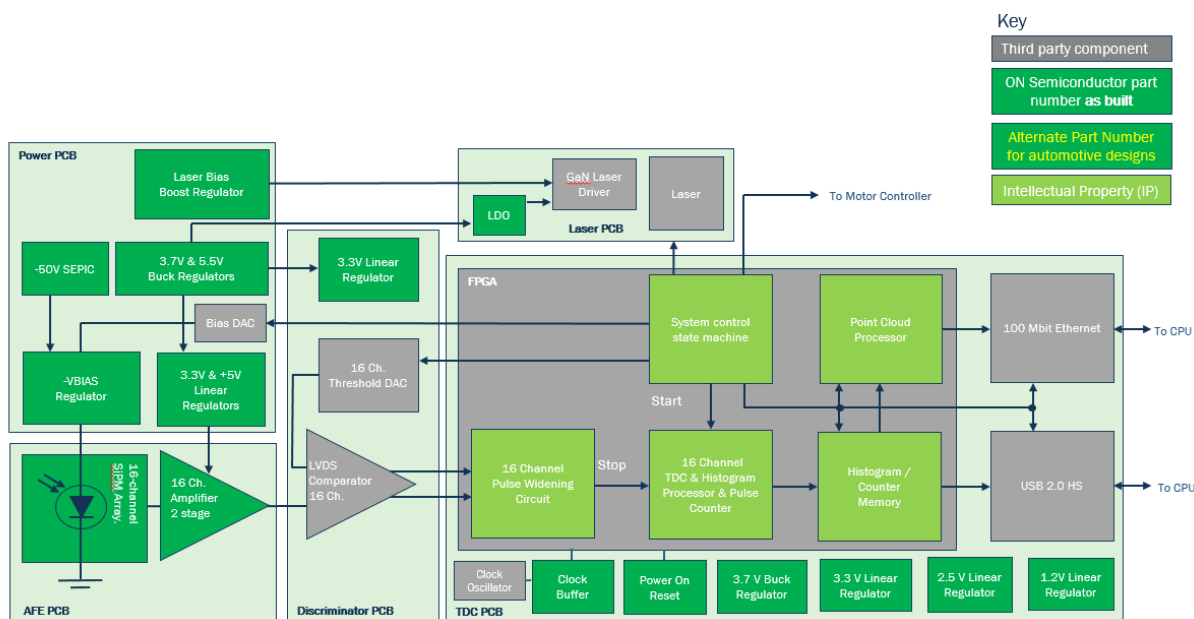


Figure 15. 16 Channel Reference Design Block Diagram

16チャンネルLiDARリファレンス設計は、車載用や産業用市場などのスキャニングLiDARアプリケーションに適しています。これは、以下に示すモジュール式のサブブロックコンポーネントとして設計された数枚のプリント回路基板(PCB)の設計ファイル用ソフトウェアリリースパッケージで構成されています。

- 電源PCB
- レーザPCB
- アナログフロントエンド(AFE)PCB

- 弁別器PCB
- TDC/処理PCB

このリファレンス設計の各サブブロックは、組み立て、テスト、検証が行われています。本設計には、レーザパルスの発生、戻り信号の検出、点群の生成に必要なすべての電子機能が含まれています。システムの光学系、スキャニング用ハードウェア、モータ制御はこの設計の対象外であることにご注意ください。

このリファレンス設計は、そのままオプトメカニカルサブシステムとともに使用して、完全なLiDARシステムを構築することができます。あるいは、オンセミ製デバイスの用途に従って使用する場合は、個々のブロックを設計の一部として活用することも可能です。

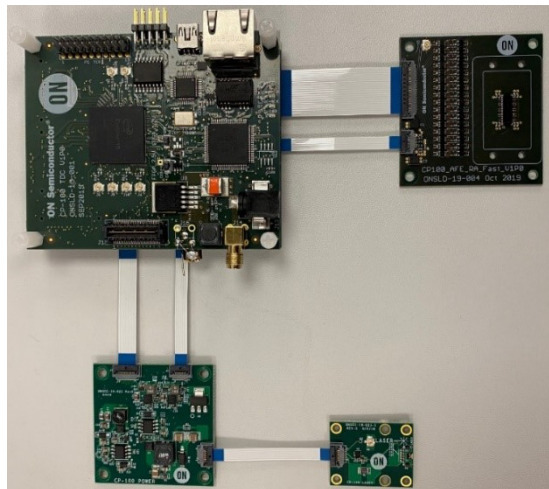


Figure 16. Physical PCBs

電源PCBには、12 V入力を50 Vまで昇圧するSiPM用昇圧コンバータが搭載されています。SiPMのバイアス電源は、SPI通信を介して変更し感度を制御できます。昇圧コンバータはレーザPCBへの電源供給に使用することもできます。

光トランスミッタは波長905 nmの単一レーザ照射器です。この端面発光レーザ光源は、GaNベースのディスクリレーザドライバを使用し、3 nsパルス幅で75 Wのピーク出力のレーザパルスを実現できます。

AFEボードには検出器とフロントエンド回路が搭載されています。検出器はArrayRDM-0116A10-DFNであり、これは905 nmで16%という業界最高の光子検出効率(PDE)を備えた16チャンネルリニアアレイです。SiPMアレイの各チャンネルは、16の深度ポイントを同時に出力するために並列に読み出されます。検出器は増幅段に接続され、単一光子イベントの観測に必要なゲインを得ています。



Figure 17. ArrayRDM-0116A10-DFN

弁別器PCBはSiPMアレイの各チャンネルにコンパレータを備えています。SiPMの信号を基準スレッシュホールドと比較し、TDCの停止信号を発生させます。コンパレータのスレッシュホールドは、SPI制御のデジタル-アナログコンバータ(DAC)を介して制御できます。

このリファレンス設計は、16チャンネルのTDCベースの読み出しを採用し、1次元検出器アレイ全体に戻ってきたパルスを同時にデジタル化します。TDCはIntel®Cyclone®10LP FPGAに実装されています。このFPGAは、タイミングヒストグラムと3次元点群データを生成するだけでなく、レーザおよびモータ制御機能向けにシステム制御信号とタイミング信号を出力します。

目標とするLiDARシステムは、視野全体に単一レーザビームをスキャンし、高分解能の3次元深度マップを作成できます。

本リファレンス設計の詳細は、depthsensing_questions@onsemi.comにお問い合わせください。

その他の機能

- デッドタイムの短い高速、広ダイナミックレンジのTDC
- TDCの分解能を31~250 psの間でプログラム可能
- TDCの最大範囲は150 m(4096ビン)
- シリアルおよびUSBインタフェース(イーサネットは近日対応予定)
- 可能な限り車載グレードの部品を使用

車載要件

車載アプリケーションには、過酷な条件や広い温度範囲で確実に動作できる高性能センサとデバイスが必要です。これらの課題と顧客の要求を満たすために、オンセミは現在、車載アプリケーション専用設計されたSiPMおよびSiPMアレイ製品を数種類提供しています。これには本リファレンス設計で使用しているArrayRDM-011A16-DFNも含まれます。

当社のSiPMおよびSiPMアレイ製品の詳細は、depthsensing_questions@onsemi.comにお問い合わせください。

これらは今日市場で入手可能な初の車載認証SiPMセンサです。これらの製品の車載認証を取得するために、オンセミは研究所とデザインセンタに製造基準IATF16949の認証を受けました。量産開始に先立ち、これらの製品は、車載電子部品評議会(AEC)によるSiPMなどのオプトエレクトロニクス半導体向け規格AEC-Q102に準拠した認定ストレス試験を受けています。

16チャンネルLiDARリファレンス設計には、以下が含まれています。

- リファレンス設計のアプリケーションノート
 - 設計の詳細な説明
 - 実装に関するアドバイス
 - ハードウェアテストの結果
 - インタフェースコマンドライブラリ
- パッケージのリリース
 - FPGAのコード
 - Gerberファイル
 - Cadenceファイル
 - Eagleファイル
 - 完全なBOM

対象アプリケーション

Table 2. TARGET APPLICAITON

Application	Recommended Reference Design	
	Laser Rangefinder	16-Channel LiDAR Ref Design
AUTOMOTIVE		
Long/Short Range LiDAR	Yes + Scan Mechanism	Yes + Scan Mechanism
Turn Assist/Blind Spot Detection	Yes + Scan Mechanism	Yes + Scan Mechanism
ADAS	Yes + Scan Mechanism	Yes + Scan Mechanism
INDUSTRIAL/CONSUMER		
Fill Level Monitoring	Yes	Yes
Storage Retrieval	Yes	Yes
Stack Height Control	Yes	Yes
Measuring the Thickness of Metal, Ceramics, Wood etc.	Yes	Yes
Distance Measurement	Yes	Yes
Distance Monitoring	Yes	Yes
Position Feedback in Industrial Automation	Yes	Yes
Level Control, e.g. in the Packaging Industry	Yes	Yes
Exact Positioning of Stacker Cranes, Gantry Cranes, and Conveyors	Yes	Yes
Safeguarding Minimum Distances	Yes + Scan Mechanism	Yes + Scan Mechanism
Verifying Occupancy Conditions	Yes + Scan Mechanism	Yes + Scan Mechanism
Overhang, Gap, and Compartment-occupied Checks	Yes + Scan Mechanism	Yes + Scan Mechanism
Avoidance of Collisions for AGVs, Suspended Conveyor Systems, or Freely Navigating Platforms	Yes + Scan Mechanism	Yes + Scan Mechanism
Object Detection and Classification	Yes + Scan Mechanism	Yes + Scan Mechanism
Safety/Proximity	Yes + Scan Mechanism	Yes + Scan Mechanism
Security	Yes + Scan Mechanism	Yes + Scan Mechanism
People Counting	Yes + Scan Mechanism	Yes + Scan Mechanism

Intel and Cyclone are registered trademarks of Intel Corporation in the U.S. and/or other countries.
Intel and the Intel logo are trademarks of Intel Corporation or its subsidiaries.

onsemi, **Onsemi**, and other names, marks, and brands are registered and/or common law trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC dba "**onsemi**" or its affiliates and/or subsidiaries in the United States and/or other countries. **onsemi** owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of **onsemi**'s product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf. **onsemi** reserves the right to make changes at any time to any products or information herein, without notice. The information herein is provided "as-is" and **onsemi** makes no warranty, representation or guarantee regarding the accuracy of the information, product features, availability, functionality, or suitability of its products for any particular purpose, nor does **onsemi** assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using **onsemi** products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by **onsemi**. "Typical" parameters which may be provided in **onsemi** data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. **onsemi** does not convey any license under any of its intellectual property rights nor the rights of others. **onsemi** products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use **onsemi** products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold **onsemi** and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that **onsemi** was negligent regarding the design or manufacture of the part. **onsemi** is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

ADDITIONAL INFORMATION

TECHNICAL PUBLICATIONS:

Technical Library: www.onsemi.com/design/resources/technical-documentation
onsemi Website: www.onsemi.com

ONLINE SUPPORT: www.onsemi.com/support

For additional information, please contact your local Sales Representative at www.onsemi.com/support/sales