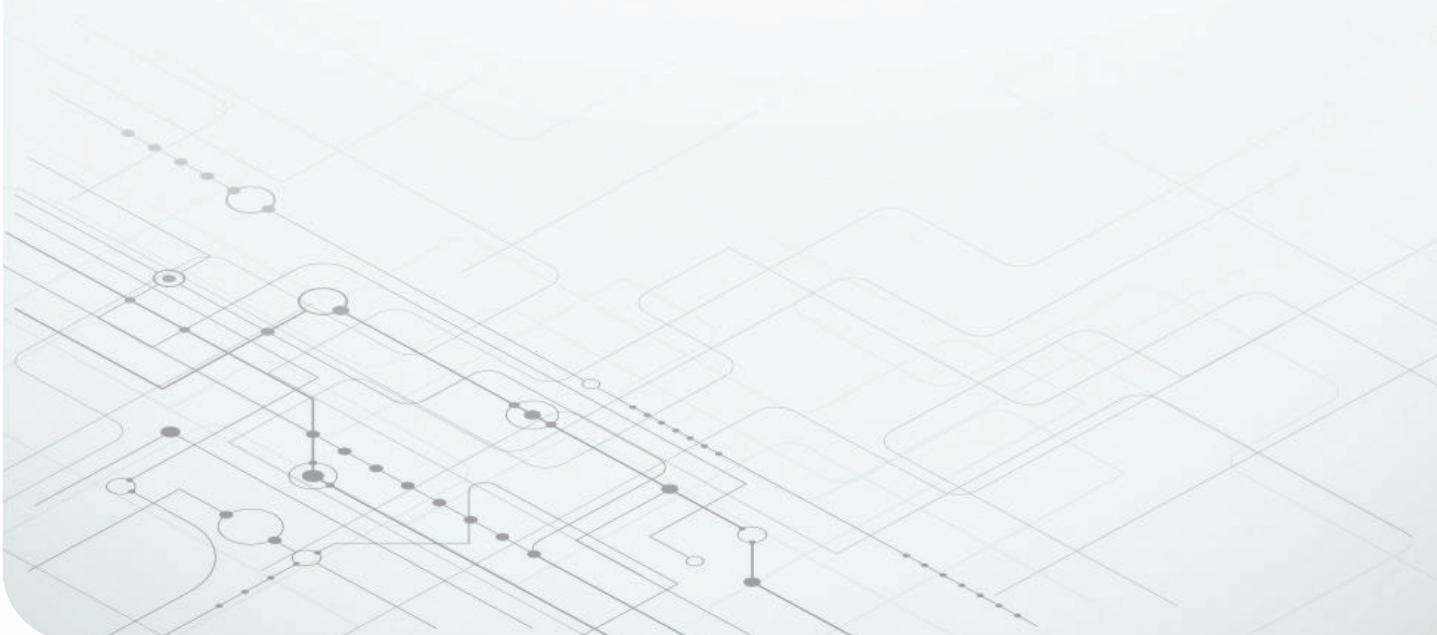


車載 LiDAR の紹介



Anthony Vaughan
High-Speed Amplifiers

Samir Cherian
High-Speed Amplifiers



LiDAR は光の検出と距離測定を意味しますが、タイム オブ ライト (ToF)、レーザー スキャン、レーザー レーダーとも呼ばれます。物体を検出し、距離をマップ化するセンシング方式です。このテクノロジーは、光学パルスでターゲット (目標物) を照射し、反射信号の特性を測定する方法で動作します。光学パルスの幅 (時間的長さ) は、数 ns (ナノ秒) から数 μ s (マイクロ秒) の範囲が一般的です。

図 1 に LiDAR の基本的な原理を示します。特定のパターンで光を照射し、反射光を受信側で収集して情報を抽出します。パルスの電力、ラウンドトリップ (往復) 時間、位相シフト、パルス幅は、光信号から情報を抽出するために使用する一般的なパラメータです。

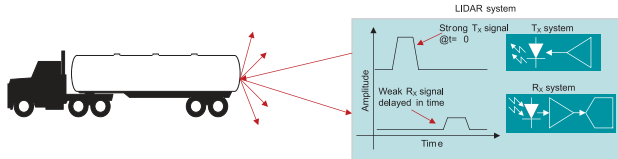


図 1. パルス形式の ToF をベースとする LiDAR システム。

光を選択するのはなぜでしょうか。レーダー、超音波センサ、カメラのような他の既存テクノロジーと LiDAR の違いはどのような点にあるのでしょうか。LiDAR を重視する動きがあるのはなぜでしょうか。このホワイト ペーパーは、長距離 LiDAR の文脈を想定してこれらの質問に回答します。長距離 LiDAR は、自動運転にとって重要なセンサになると予測されています。自動運転車のほかに、LiDAR は 3D 航空写真や地理情報、ファクトリ (工場) 内の安全性システム、スマート弾薬、気体分析のようなアプリケーションでも使用できます。

自動運転車による検出と画像処理

メーカー各社が最新の自動車に装備しているのは、多様な最新制御機能とセンシング機能です。衝突警報と衝突回避のシステム、死角モニタ、車線維持支援、車線逸脱警報およびアダプティブ (状況適応型) クルーズ コントロールは、ドライバーの支援と特定の運転業務を自動化することを目的とした確立済み機能の数例であり、その結果、運転の安全性と容易さが向上します。

LiDAR、レーダー、超音波センサ、カメラにはそれぞれ固有の長所と短所があり、位置付けは互いにある程度異なります。

高度自動運転車または全面的自動運転車は通常、複数のセンサ テクノロジーを使用して、多様な気象条件や照明条件の下でも車両の周囲に関する長距離および短距離のマップを作成します。互いを補完する技術に加えて、冗長性を高め、安全性を向上させるためには、十分な重複があることも重要です。センサ フュージョンとは、複数のセンサ テクノロジーを使用し、車両の周囲を取り巻く環境に関し、高精度で信頼性の高いマップを生成するという概念を意味します。

超音波は、空気が原因で、数メートル先で大幅に減衰します。したがって、超音波センサは主に、短距離の物体検出に使用します。

カメラは、コスト効率に優れた、容易に入手できるセンサです。ただし、役立つ情報を抽出するにはかなりの処理量を必要とするほか、周囲の光条件によって大きく左右されます。カメラは、「複数の色を識別」できる唯一のテクノロジー、という点で独自の存在です。車線維持支援機能を搭載している自動車は、カメラを使用してこの動作を実現します。

LiDAR とレーダーは共通事項が幅広く、互いに補い合う機能であり、周囲のマッピング作成や、物体の速度測定に使用できます。複数のカテゴリで、この 2 つのテクノロジーを比較してみましょう。

- **距離。**LiDAR と画像レーダーの各システムは、数メートルから 200m 以上の距離にあるさまざまな物体を検出できます。LiDAR は、近接距離にある物体の検出が困難という性質があります。レーダーは、1 メートル未満から 200m 以上の距離にあるさまざまな物体を検出できますが、対応可能距離はシステムのタイプ (短距離、中距離、長距離レーダー) によって異なります。
- **スペクトル分解能。**これは、LiDAR が真価を発揮する分野です。LiDAR には、レーザー光を平行化 (コリメート) する能力があり、905nm ~ 1,550nm という短い波長を使用するので、LiDAR を採用する場合、約 0.1° 単位の赤外線 (IR) 光スペクトル分解能を実現できます。この分解能により、大量のバックエンド処理なしで、非常に高い分解能で物体の 3D 特性評価を実施することができます。それに対し、レーダーの波長 (77GHz の場合は 4mm) は小さな特徴まで分解するのは困難であり、距離が長くなるほどその傾向が強くなります。

- **視野角 (FOV)**。半導体 LiDAR と半導体レーダーはどちらも優れた水平 FOV (アジマス) を達成しており、特に機械式 LiDAR システムは 360 度の回転を通じて、すべての先進運転支援システム (ADAS) テクノロジーの中で最大の水平 FOV を実現します。過去の経緯から、LiDAR はレーダーよりも垂直 FOV (仰角) が優れています。LiDAR は、方位角および仰角の両方において角度分解能を提供し、これは物体識別の精度向上に不可欠な主要機能の一つです。
- **気象条件**。レーダー システムの大きな利点の 1 つは、雨、霧、雪に対する信頼性堅牢性です。一般的に、そのような気象条件下で LiDAR の性能は低下します。1,550nm の IR 波長を使用すれば、LiDAR は不利な気象条件下でも比較的良好な性能を達成します。
- **周辺光**。LiDAR とカメラはどちらも、周囲光条件の影響に対して敏感です。ただし、夜間には LiDAR と画像処理の各レーダー システムは独自に照明を提供するので、非常に高い性能を実現します。レーダーと変調 LiDAR の各手法は、他のセンサからの干渉に対して耐性があります。
- **コストとサイズ**。レーダー システムは近年は主流になりつつあり、大幅な小型化と低コスト化が進んでいます。LiDAR の人気が高まるにつれて、以前に比べるとコストは大幅に低下しました。以前はおよそ 50,000 ドルを要していたものが、現在は 10,000 ドル以下です。統合が進展した結果、レーダー システムのサイズ縮小とコスト削減が進んでおり、最新の各種自動車はレーダーを主流として採用しはじめています。一方、数年前から使用されている機械式スキャン方式の LiDAR システムは、さまざまな自律走行ロボットタクシーに取り付けた例で一般的に知られていますが、かさばるという特徴がありました。ただし、テクノロジーの進展によって数年の間に LiDAR の小型化が進みました。業界は半導体 LiDAR への移行を進めており、システム サイズはいっそう縮小し、コストも削減する見込みです。

LiDAR の種類

入手可能な LiDAR システムにはさまざまな種類がありますが、ここでは主にパルス幅の狭い (短パルス) ToF 方式に注

目します。LiDAR システムには、以下のような 2 種類のビームステアリング方式があります。

- **機械式 LiDAR** は高グレード光学系と回転機構を使用して、広い (一般的には 360 度) FOV (視野角) を実現します。機械的側面では、広い FOV にわたって高い信号雑音比 (SNR) を実現しますが、その結果、かさばる実装を招きます (ただし、最近ではサイズの縮小が進んでいます)。
- **半導体 LiDAR** は機械式の回転コンポーネントを搭載していないので、FOV は狭くなりますが、安価でもあります。自動車のフロント、リア、サイドで複数のチャネルを使用し、それらのデータを融合する方法で、機械式 LiDAR に匹敵する FOV を達成できます。

半導体 LiDAR には、以下のような複数の実装方式があります。

- **MEMS (微小電気機械システム) LiDAR**。MEMS LiDAR システムは、超小型のミラーを複数使用しており、電圧のような刺激を印加する方法でそれらのミラーの角度を変えます。実質的に、MEMS は、機械式スキャン ハードウェアを電子機械式の等価機能で置き換えるものです。レーザの光収集開口部は、受信 SNR を決定する要因ですが、MEMS の場合、開口部はかなり小さくなっています (数 mm)。複数の方向にレーザー ビームを動かすためには、複数のミラーをカスケード接続する必要があります。これに伴う配列プロセスは重要です。それに加えて、いったん取り付けられた後も、移動する自動車でごく一般的に発生する衝撃や振動に対して敏感に反応します。MEMS ベースのシステムで発生する可能性のあるもう 1 つの電位落とし穴は、-40°C から始まる自動車の仕様ですが、これは MEMS デバイスにとって課題となる可能性があります。
- **フラッシュ LiDAR**。フラッシュ LiDAR の動作は、光学式フラッシュを使用する標準的なデジタル カメラの動作によく似ています。フラッシュライダーでは、単一の大領域レーザー パルスが前方の環境に照射され、レーザーに近接して配置されたフォト ディテクタの焦点面アレイが後方散乱光をキャプチャします。このディテクタは画像の距離、位置、反射強度をキャプチャします。機械式レーザー スキャン方式とは異なり、この方式はシーン全体を単一の画像としてキャプチャするので、データ キャプチャレートはかなり

高速になります。加えて、画像全体を 1 回のフラッシュでキャプチャするので、画像の歪みを招く可能性のある振動の影響に対して、この方式はより堅牢です。この方式の短所は、実際の環境でリトリフレクター (再帰反射器) が存在する可能性があることです。リトリフレクターは、大部分の光をそのまま反射し、散乱光がほとんど生じません。その結果、センサ全体が有効な情報を実質的に何も取得できず、役に立たない状態になります。この方式の別の短所は、シーン全体を照射し、十分遠くまで到達させるために、非常に大きいピークレーザー出力が必要になることです。目の安全性要件に準拠するため、フラッシュ LiDAR は主に短距離から中距離の検出システムで使用されます。

- **光学式フェーズ アレイ (OPA)**。OPA の原理は、フェーズドアレイレーダーに似ています。OPA システムを使用する場合、単一の光学式位相変調器が、レンズを通過する光の速度を制御します。光の速度の制御を通じて、図 2 に示すように、波面 (ウェーブフロント、時刻方向の光の等高線) を制御することができます。上部ビームは遅延していませんが、中下部ビームは量を大きくして遅延します。この現象は実質的に、レーザービームを「操作」し、複数の方向に向けることになります。同様の方法で、センサへ向かう反射された散乱光を操作することもでき、その結果、機械式可動部品が不要になります。

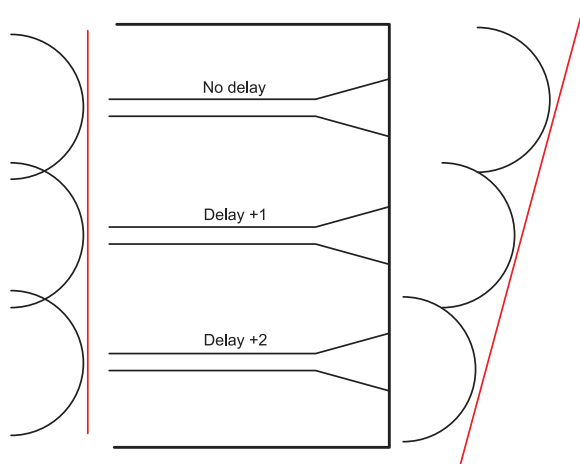


図 2. OPA です。

- **周波数変調連続波 (Frequency-modulated continuous wave、FMCW) LiDAR**。ここまでに説明した各方式がパルス幅の狭い光を使用する ToF の原理をベースとしているのに対し、FMCW LiDAR はコヒーレント (可干渉) 方式

を使用して周波数変調されたレーザー光の短いチャープを複数生成します。反射されたチャープの位相と周波数を測定することで、システムはドップラー原理を使用して距離と速度の両方を測定できます。FMCW 方式を使用する場合、計算負荷と光学系は簡素化できます。ただし、チャープを生成するために、複雑さが増す結果になります。FMCW システムに必要なレーザー電力は、パルス形式の ToF システムが必要とする電力よりかなり小さいので、FMCW は非常に長距離のセンシング アプリケーションに適しています。また、霧、雨、雪などの悪天候下でも優れた性能を発揮します。

LiDAR サブシステム

図 3 に、シグナル チェーン、電力、インターフェイス、クロック供給、監視、診断の各サブシステムを含め、LiDAR モジュール サブシステムの機能全体を示します。LiDAR シグナル チェーンの主なサブシステムを構成しているのは、送信システム (Tx)、受信システム (Rx)、ポイント クラウド情報を抽出するためのカスタム デジタル処理システムです。TI は、青緑で塗りつぶした機能ブロックに対応するデバイス オプションを提供しています。

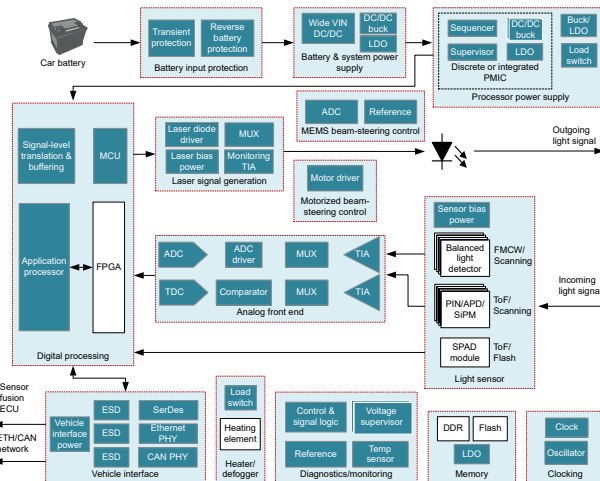


図 3. シグナル チェーン、電力、インターフェイス、クロック供給、モニタまたは診断の各サブシステムを含む LiDAR モジュール。

LiDAR システムの統合

さらなる統合が必要なシステム向けに、TI は Tx パス用の LiDAR レーザードライバと、光検出器から A/D コンバータ (ADC) または時間/デジタル コンバータ (TDC) への Rx パス内の接続を扱うアンプを提供しています。LMG1025 は、1.25ns のパルスを生成できる外付け窒化ガリウム電界効果トランジスタ (FET) を駆動するディスクリート レーザードライバです。TI の統合型 LMH13000 レーザードライバは外部 FET を必要とせず、レーザを駆動して最大 5A (50mA) の可変電流を供給し、1ns 未満のパルスを生成することができます。また LMH13000 はディスクリートレーザライバソリューションに比べておよそ 4 分の 1 の小型化を実現しています。複数の LMH13000 デバイスを並列に使用すると、レーザに流れ込む電流の量を増やすことができます。

TI の受信パス アンプは ADC ベースのシステムで使用する LMH32401 と LMH32404 また TDC ベースのシステムで使用する LMH34400 で構成されています。これらのデバイスは、高速トランスインピーダンス アンプ (TIA) 補償ネットワークを内蔵しており、環境光キャンセル、入力過電流クランプ保護、マルチプレクサ モードなどの機能を備えているため、LiDAR アプリケーションに役立ちます。

環境光キャンセル回路により、DC 周囲光信号を除去することで入力電流をよりの確に検出できるようになります。また、フォト ダイオードとアンプの間の AC 結合の代わりにこの回路を使用できるため、基板面積を削減できます。入力過電流保護クランプは、アンプがノードを検出して飽和状態に移行すると、過剰な電流を吸収して正の電源に分配します。これにより、アンプはより速くリニア状態に戻り、パルス延長を数ナノ秒未満に制限できます。内蔵 LiDAR TIA には出力スイッチが内蔵されており、複数のフォト ダイオードとアンプ チャンネルをより少ない ADC および TDC チャンネルに接続できるため、ディスクリート マルチプレクサが不要になります。これによって、複数の ADC チャンネルや TDC チャンネルで通常は処理される

ボード面積を削減しながら、複数のセンサを使用することが可能になります。

まとめ

世界は、自動運転車の商業的実用化を目指す魅力的な工程を開始していますが、この分野を推進するテクノロジーとアーキテクチャは常に変化しています。LiDAR はこの領域で比較的新しく登場した選択肢ですが、このテクノロジーが実現する利点は急速な革新を促し、確立や他のセンサ システムに比べて高性能、小型化、および同等のコストを実現することができます。

その他の資料

- **TI の ADAS アプリケーション と TI のリファレンス デザイン**をご確認ください。
- TI の車載用**高速オペアンプ**、**高速 A/D コンバータ**、**温度センサ**製品ラインアップをご確認ください。
- 関連ホワイト ペーパー:
 - **技術革新を通じて自動車をより安全に。**
 - **車載用テクノロジーを駆動するスケーラブルなエレクトロニクス。**
 - **先進運転支援システム (ADAS) による自動運転車の実現。**

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、テキサス・インスツルメンツ製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツはその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。テキサス・インスツルメンツや第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用される テキサス・インスツルメンツの保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated