

信頼される自動運転用 LiDAR に向けて～高解像度化とセキュリティ～

吉岡 健太郎

慶應義塾大学 (〒 223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)

Towards Reliable LiDARs for Autonomous Driving: A Review of High-resolution and Security Features

Kentaro Yoshioka

Keio University(223-8522, Hiyoshi 3-14-1, Yokohama, Kanagawa)

Abstract

To ensure the reliability of AI systems, it is crucial to consider the reliability of the sensors they use. In this paper, we will focus on the reliability of LiDAR, a key 3D sensor used in autonomous driving and robotics. We will address two key aspects: the importance of high-resolution LiDAR for autonomous vehicles, and the potential for LiDAR to be compromised through "spoofing" attacks. First, we will explore the importance of high-resolution LiDAR for autonomous vehicles, and how it allows cars to fully utilize surrounding 3D information. We will also discuss recent developments in "next-generation" LiDARs from a circuit system perspective. Next, we will turn to the issue of LiDAR security, specifically the threat of spoofing attacks. We will introduce research on this topic and discuss methods for defending against such attacks. By examining these two key aspects of LiDAR reliability, we aim to shed light on the challenges and solutions for achieving trustworthy AI.

Keywords: LiDAR, SoC, Next-gen LiDAR, LiDAR spoofing, autonomous driving

1 イントロダクション

人間は最新のハードウェアと比べても優秀なセンサや判断機構を持つ一方で時に信じられないほど幼稚なミスをしてしまう。そしてそのようなミスは自動車の運転時に取り返しのつかない結果をもたらす。日本のみでも2021年における交通事故死者数は2,636人であり負傷者数は361,768人に登る¹⁾。このようなミスをゼロにするのは不可能であるため、人間のミスをカバーするために Advanced Driver-Assistance Systems(ADAS) 技術が発展してきた。SAEでは自動運転にはレベルが5つ設定されている²⁾。例えば2022年現在、自動ブレーキやレーンキープといったレベル0-1の自動運転は多くの市販車に搭載されている。またTesla社はレベル2の部分自動運転機能をリリースしており、国内メーカーでも速度や使用箇所に限定はあるもののレベル3相当の自動運転機能を搭載した製品もある。このように時間をかけ人間ドライバーから機械制御へ運転機能を任せようとしている。

自動運転に使用する Depth センサについてまとめた表が Table 1 である。いずれのセンサも性能にトレードオフが存在することが重要である。例えば、LiDAR はミリ波レーダ、ステレオカメラ、超音波と異なり、スキャンを行う機械部が必要であり、他のセンサに比べて必然的に高価である。一方で Fig.1 に示す LiDAR の出力例からわかる通り、LiDAR は距離センサの中でも高い解像度を持つ唯一の距離センサであることから注目を集めている。

自動運転用距離センサに求められる遠距離性能と画像分解能についてより詳しく見てみよう。一般的に、自動運転のためには、前方 200m をセンシングする距離センサが必要である。これは、通常、120 km/h で高速道路を走行する際のブレーキ距離が 150 m であるためである。例えば、VLP-32^{3),4)} は、自動運転のプロトタイプ車で採用されているが、最大距離は 50 m であり、高速道路での利用には十分でない。また、市街地を走行する際

Table 1. Characteristics of Automotive Distance Sensors. LiDAR has an excellent balance of resolution and distance, but cost has been an issue for many years, but in recent years circuit integration have made LiDAR less expensive.

Features	Ultrasonic	Stereo Camera	mm-wave Radar	LiDAR
Distance	⊗	⊗	⊗	⊗
High image resolution	⊗	⊗	⊗	⊗
Environment robustness	⊗	⊗	⊗	⊗
Cost	⊗	⊗	⊗	⊗→⊗

には、遠方の歩行者を見落とさないことが重要である。このためには、0.1 0.2 度の水平角度分解能が必要であるが、超音波やレーダ⁵⁾では達成が困難である。また、自動運転の信頼性を高めるためには、あらゆる天候（非常に強い日差し、雨、雪、霧）でセンシングが可能であることが重要である。中でも、ミリ波レーダは天候の影響を受けにくいセンサであることが知られている。しかし、LiDAR は、例えば霧のような環境ではレーザが散乱するため、有効距離が短くなる。そのため、一つのセンサで自動運転システムを構築することは困難であり、最終的にはセンサ同士がお互いの弱点を補ってあってアプローチを取る必要がある。このようなアプローチをセンサフュージョンと呼ぶ。

本論文の対象読者はこれから車載 LiDAR について入門するレベルを想定しており、車載 LiDAR 分野の発展方向を俯瞰し捉えることを目標とする。メインにカバーするのは 2022 年現在最も車載用途で量産化が期待される 850-950nm の遠赤外レーザを用いるスキャン機構を持つ dToF 型 LiDAR である⁶⁾⁻¹⁰⁾。本論文の構成は以下である。まず 2 章では LiDAR の原理から車載 LiDAR 特有の課題について説明する。そして 3 章ではベースとなる第一世代 LiDAR から次世代 LiDAR への発展をカバーする。そして 4 章では LiDAR のセンサセキュリティについて述べる。最後に 5 章でまとめと今後の展望を述べる。

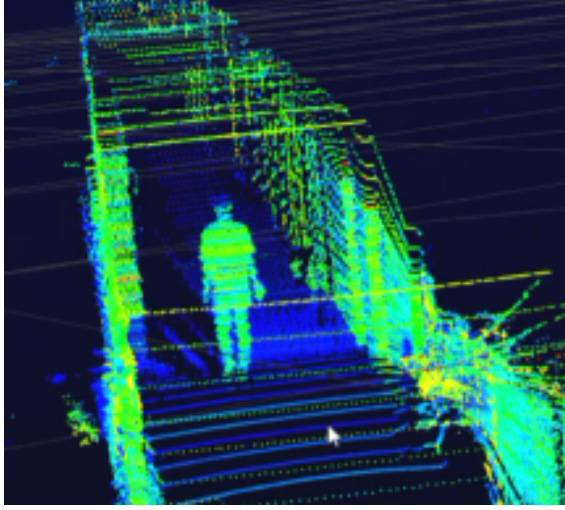


Figure 1. Example of LiDAR output. LiDAR is the one and only sensor that can acquire 3D information of the surroundings with high resolution. The image was acquired by VLS-128.

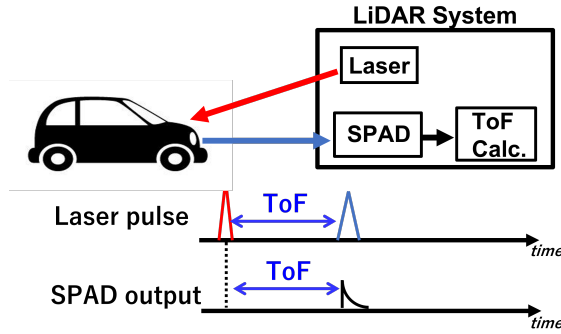


Figure 2. Principle of LiDAR measurement. The distance to the target is calculated based on the Time of Flight (ToF), which is the time it takes for the emitted laser to reflect from the target object and return.

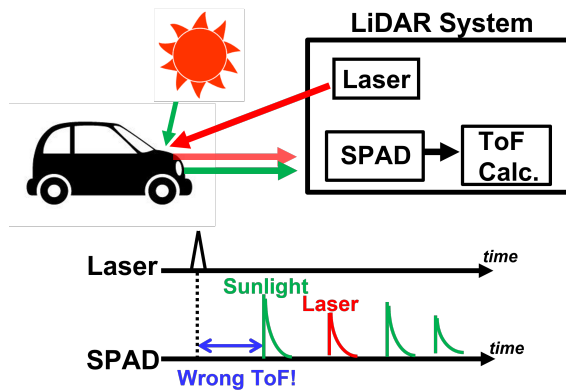


Figure 3. Challenges specific to automotive LiDAR. For example, sunlight that exceeds the intensity of the reflected laser can cause the ToF to be measured incorrectly, resulting in erroneous measurements. LiDARs need to make reliable measurements even under such harsh conditions.

2 LiDAR 原理と車載特有の課題

本論文で取り扱う direct Time of Flight(dToF) LiDAR の動作原理を Fig.2 を元に簡単に説明する。このような LiDAR は筐体から出射したレーザーが対象物体に反射し

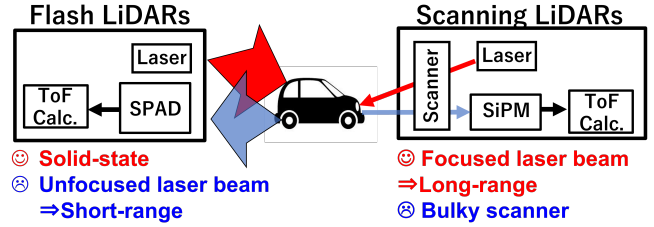


Figure 4. Comparison between the Flash and Scanning LiDARs

戻ってくるまでの時間 (time-of-flight ToF) を元に

$$\text{Distance} = \frac{\text{Light speed} \times \text{ToF}}{2} \quad (1)$$

と距離を導出する。精度の高い (距離分解能の高い) 計測のために LiDAR が備える量子化器の時間分解能は高速である必要がある (ADC ならばサンプルレートが高い等)。

LiDAR の原理自体は単純なものの、車載用 LiDAR は主に以下の点で設計が難しい：

- 200m といった遠距離測距性能が要求される
- 様々な天候・環境でも高精度な計測が期待される。

前者に関してだが、レーザは距離の自乗に従い減衰するため、例えば 50m 測距に比べると 200m 測距では帰還するレーザ光子数は 1/16 となっており動作はとても厳しい。また野外で使用する LiDAR では太陽光が最大のノイズ源となり、特に車載用途では 100kLux といった非常に強い太陽光下でも動作することが要求される。このような過酷な動作環境を Fig.3 に示しており、遠距離かつ強い太陽光の環境下ではレーザよりも太陽光のパルスが大きくなることもあり測距は非常に難しい。

LiDAR の測距は原理的には SNR で表現できる。ここで signal は帰還するレーザ光子数、ノイズはある単位時間に入力されるノイズ光子数と定義して表せる⁷⁾。

$$\text{LiDAR SNR} = \log_{20} \frac{\text{Number of laser photons}}{\text{Number of background photons}} \quad (2)$$

車載 LiDAR には、eye-safety を守るため出射レーザパワーに制限がある。車載用の LiDAR ではどんな状況でも人の目に害を与えないように class-1 eye-safety を遵守するのが一般的である。既存の研究では、既にこの制限に達するほどの強いパルスレーザを使用しており、更にレーザパワーを増加することはできない。一方で、式 (2) から、太陽光をフィルタリングする光学フィルタや、レーザを受光するための光子数を増やし受光素子の感度を向上させることは、SNR の改善に直結することがわかる。

2.1 LiDAR の基本アーキテクチャ

Fig.2 に示す測定方式は direct Time of Flight(dToF) 方式と呼ばれ、車載 LiDAR で遠距離測定が可能な主流方式である。dToF 型 LiDAR はその中でもフラッシュ型¹¹⁾とスキャン型に大別される。Fig.4 に示すとおり、フラッシュは画角全面にレーザを放射し反射光もイメージセンサのような 2 次元の受光素子アレイで受ける。この方式のメリットは、機械部を必要とせず低コストで実現できること、さらにフレームレートも速いことである。一方で Flash LiDAR の画素数を $N \times M$ とすると、レーザ電力 P は $N \times M$ 画素に拡散されるため 1 画素辺りのレー

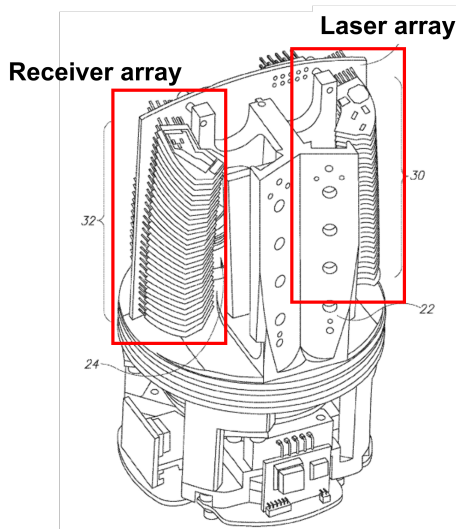


Figure 5. Velodyne HDL-32 diagram⁴⁾

ザパワーは $P/(N \times M)$ と弱い。そのためフラッシュ型では高解像度化は容易な反面、 $>100\text{m}$ といった遠距離測定を実現できている例は少ない。一方でスキャン型は一度に M ピクセルを得て水平、または二次元的にスキャンする。この方式のメリットとしてレーザを絞れるためピクセル毎のレーザパワーは P/M とフラッシュ型に対し非常に良好な SNR を達成可能で遠距離測定が実現できる。その一方で、スキャン機構が必要なため製造コストが大きいというトレードオフを持つ。

スキャン方式にも回転ミラー^{3), 12)}、ポリゴンミラー⁶⁾⁻⁸⁾、MEMS ミラー¹⁰⁾と複数種類が存在する。回転ミラーは筐体サイズは非常に大きい光学特性がよく（レーザ減衰が少ない）、360度のデータが取得可能なことが特徴である。ポリゴンミラーはFoV中をラスタースキャンすることでデータを得る。このようなスキャンを行うためにはレーザと受光両方に対しミラーを挿入する必要があり、ミラーを駆動するモータも合わせ筐体が大きくなってしまふのが欠点である（車載用途ではセンサ体積を最小化することが求められる）。最後にMEMSミラーは可動ミラーをMEMSミラーを使い実現することでbulkyな機械部とモータをなくす。よってLiDAR筐体サイズをかなり小さくすることができる。MEMSミラーは可動部品であるものの、ポリゴンミラーや回転ミラーと区別するため慣習的にソリッドステート型LiDARとも呼ばれる。一方でMEMSミラーは小さく光学特性は劣悪なためLiDAR SNRが大きく低下するのがトレードオフである。

3 第一世代と次世代LiDAR

3.1 第一世代LiDAR

Fig.5に示すVelodyne社の回転型LiDAR^{3), 4)}は縦方向にレーザと受信機のボードを積層することで実装されている。これはLiDAR黎明期に出された製品であることから、第一世代LiDARと定義する¹³⁾。このLiDARは非常に高品質な3Dセンシングを実現し多くの自動運転プロトタイプに使われた¹⁴⁾。

Fig.6(a)に回路図を示すとおり、第一世代LiDARの受光素子にはAPDが使われ、APD出力をTIA及びVGAで増幅した後高速ADCで量子化しToFを計算する。第一世代LiDARは各レーザと受光素子のペアで“点”

の測定を行う距離センサ(2D LiDAR)にある種”力技”で多数実装することで、高解像度なLiDARを実現しているといえることができる。しかし、このような実装には大量の部品が必要であり、結果的に第一世代LiDARは非常に高価で、壊れやすくなってしまった。また、解像度を向上させるためには、より多くの部品が必要になるため、同じ筐体で性能をスケールさせることが難しくなる。さらに、APDは一般的なフォトディテクタよりも高感度だが、遠距離測定には不十分である。そのため、第一世代LiDARの距離性能は最大50mであり、高速道路での要求を満たすことは困難であった。

3.2 次世代LiDAR

第一世代LiDARによって自動運転の研究や実証が進み、LiDAR市場は急拡大した。しかしながら低コスト化に加えさらなる性能向上が進まなければLiDARの量産車への採用は難しい。このような目標を達成するため、次世代LiDARの研究が進められてきた。本論文では次世代LiDARはSPAD、読み出し回路、そして信号処理回路の集積化によって実現されたと捉える。第一世代と次世代LiDARを回路レベルで対比しているのがFig.6である。

Ref.6)ではSPADアレーと読み出し回路、DSP及びメモリをワンチップに集積した事でLiDARハードウェアにおけるブレイクスルーをもたらし、次世代LiDARへの道筋を立てた。車載LiDAR用では後述する通りクエンチング時間を緩和するために画素辺りのSPAD数は数10となり、結果としてSPADアレー全体の素子数は100-1000のオーダーが必要となる。これらSPADアレーと信号処理回路をボード上で接続するのは実装上難しい。そこでref.6)では高電圧を扱えるhigh voltage CMOSプロセスでSPADと読み出し回路、DSP、メモリをSystem on Chip(SoC)化し、ワンチップにLiDARに必要な部品のほとんどを集積した。数多くのディスクリート部品を用いていた第一世代LiDARに対しワンチップで同じ機能を実現することで、圧倒的な低コスト化への道筋をつけた。またSoCではムーアの法則に則りCMOSスケールリングによって回路素子の性能向上を見込めるため、LiDAR性能もスケール可能となった。

3.3 受光素子

APDもSPADもフォトダイオードを強い逆バイアスで動作させることは同じだが、SPADは非常に感度が高くシングルフォトン検出も可能な受光素子である¹⁵⁾。SPADはブレイクダウン電圧 $+ \alpha$ でバイアスすることでダイオードをガイガーモードで動作させる。ガイガーモードでは光子を受光すると理想的には素子の増幅率は無限大となり、光の強度に依存せず大電流を流すため単一光子の検出を可能とする。一方でこのような電流が流れ続けるとデバイスが破壊されてしまうため、付随したクエンチング抵抗によって負帰還をかけ強制的に電流を止める。

SPADはその強烈な増幅率によって光子一つの検出を可能とし微弱なレーザ光も検出できLiDARの遠距離性能に寄与する。キープパラメータは感度に直結する光子の受光確率である(photon detection efficiency (PDE))。もう一つはクエンチングを行ってから元のモードに戻るまでに掛かる時間(クエンチング時間)である。前者が高ければ高いほど微弱なレーザ光も検出できるため遠距離性能に直結する。また後者のクエンチング時間は太陽光耐性と密接に関係し、クエンチング時間が長いと太陽光といったノイズ光でSPADが発火した後にレーザ光に反応できないパイルアップが起きてしまう。クエンチング

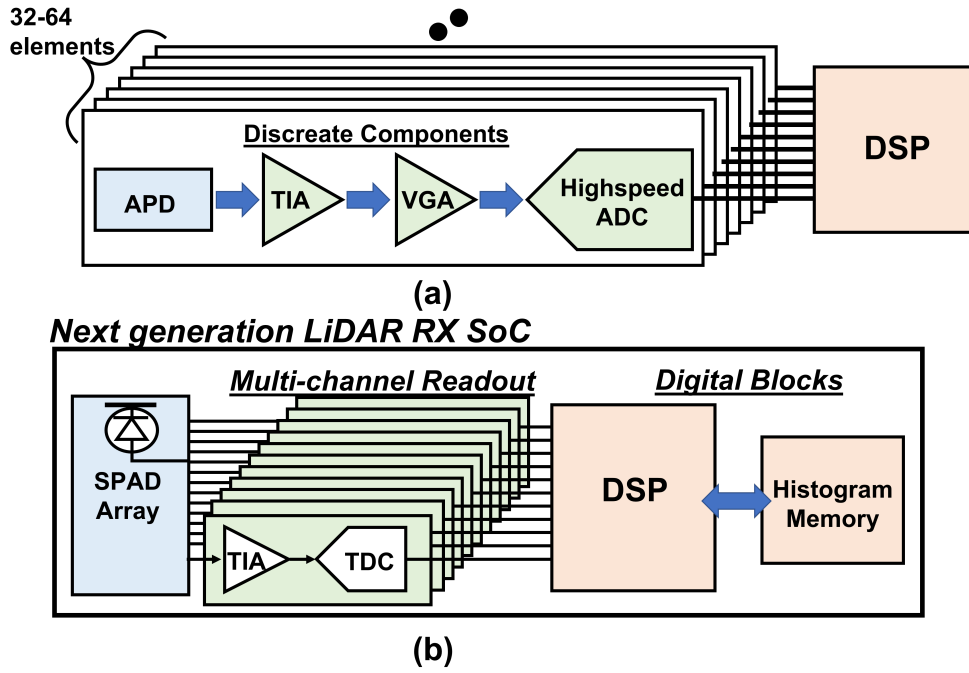


Figure 6. Comparison between first-generation and next-generation LiDAR. (a) First-generation LiDAR combines discrete components; (b) Next-generation LiDAR integrates LiDAR elements on a single chip, resulting in improved LiDAR performance due to better circuit performance and the ability to add rich signal processing functions.

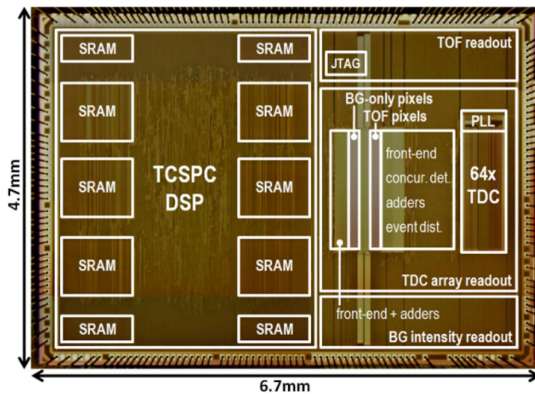


Figure 7. LiDAR SoC, integrating all SPAD, readout and signal processing circuits into a single chip⁶⁾

時間を低減するにはクエンチング抵抗を低下させるのが一番であるがデバイスの信頼性のトレードオフとなってしまう。

3.4 TDC ベース読み出し回路

APDの出力は通常のPDと同じく光量に比例したアナログ量であるのに対し、SPADは無数の増幅率を持つため光子入射時の出力をバッファで整形することでデジタルパルスとして扱うことができる。出力がパルスであったとしても dToF LiDAR であれば time of flight を測ることで距離測定が可能である。また SoC 上に数 10~数 100 の高速 ADC を実装するのは面積的に難しいが、6) では ToF を測ることに特化した回路である time-to-digital converter (TDC) 回路が使用されている。TDC はデジタル PLL の時間量子化回路として登場した回路であり、入力された時間差のデジタル値を得る回路である^{16), 17)}。

特徴として TDC はほぼデジタル回路のみで構成する

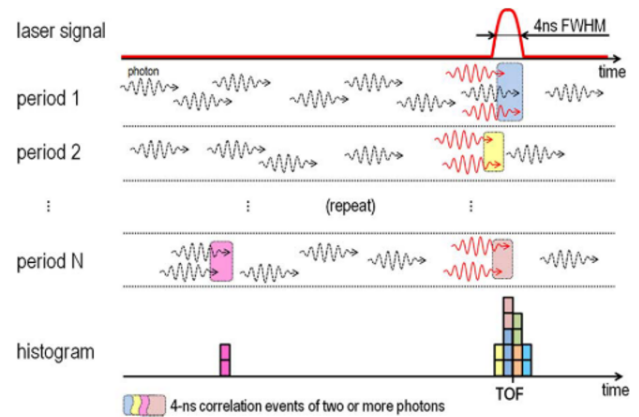


Figure 8. LiDAR distance measurement method using TDC and integration.⁶⁾ SNR improvement is implemented by making N measurements and integrating (histogramming) the detected peaks.

ことができるため、少ない面積で大量の TDC 回路を実現できる。加えて TDC の一般的な時間分解能は 10-100ps と高く、ADC では実現できない ToF 精度を達成できるため LiDAR SoC に最適な回路である。

3.5 信号処理回路

SoC 化によってリッチな信号処理を入れる余地が広がり、dToF LiDAR 特有の信号処理技術が発展した。中でもポピュラーな信号処理手法は積算である。太陽光はランダムイベントのため correlation がない箇所にピークが出現するのに対し、レーザー光は決定論的イベントのため常に同じタイミングでイベントが観測される性質を応用する。Fig.8 に示すとおり、N 回測距を行い (period 1 period N) それらの結果を積算することで、オーバーサ

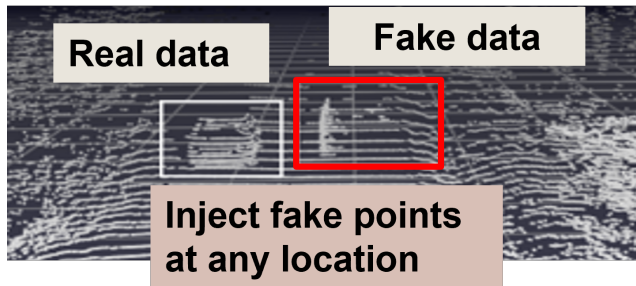


Figure 9. An example of a sensor spoofing attack. False data is injected into arbitrary coordinates to misidentify a car that does not exist.²⁰⁾

ンプリングと同様に SNR を \sqrt{N} 倍改善することができる。測定回数 N を増やすほど SNR は改善するが、FPS とのトレードオフになってしまう事に注意されたい。

また⁶⁾では TDC 起動にある程度のしきい値をもたせることで太陽光耐性を高めている。太陽光が引き起こす問題として 1) 太陽光の入射イベント全てを記録するとメモリが膨大になる。2) TDC 測定にはリセット時間が必要なため、太陽光で TDC がトリガされると肝心のレーザ検出時に TDC が動作できない危険性がある。そこで TDC トリガにしきい値をもたせることで (例えば 4 個の SPAD が同時発火時に TDC をトリガする等) 2つの問題を同時に解決する。

4 LiDAR セキュリティ

LiDAR は、自身が発射したレーザの反射信号を用いて物体までの距離を測定するセンサである。しかしこのような測定原理にはデータの注入に対する脆弱性が潜む。攻撃者がこの脆弱性を悪用し、タイミングよく攻撃レーザを LiDAR に打ち込んで虚偽データを注入することが可能であることが近年の研究で明らかにされている^{18)–22)}。このような攻撃は**センサ幻惑攻撃 (sensor spoofing)**と呼ばれ、例えば存在しない車や壁のデータをセンサデータに注入することが理論上可能である (Fig.9)。このような攻撃により自動運転車の急ブレーキを発生させ搭乗車を怪我させるような悪用が考えられるため、センサ幻惑は自動運転における重大な脅威である。

Fig.10 はセンサ幻惑攻撃の原理を示す。例えば VLP-16 といった回転型の LiDAR は周期的にスキャンするので、攻撃者は同期用の受光素子を使い LiDAR レーザのタイミングと同期し特定のタイミングで攻撃レーザパルスを送り込むことで虚偽データを注入することができる。LiDAR のスキャン方式については、データシートに詳細に記載されている場合もあれば、攻撃者が LiDAR を購入して測定することでも詳細な情報を簡単に得ることができる。またセンサ幻惑装置は基本的には LiDAR システムと同等であり、レーザを受光する受光素子とレーザ放射系を精度よく作成することができれば、原理的には LiDAR と同等の距離 (50m から 100m 先) から攻撃が可能である。我々は、センサ幻惑装置を試作し、VLP-16 に対して 6000 点程度の任意データを注入することが可能であることを確認した。優れた光学系と先端のハイパワーパルスレーザ (SPL PL90_3) を用いることで、Fig.11 に示すように文字 (KEIO CSG) を虚偽データとして注入することができる¹⁸⁾。このような自由度があれば、壁や車、人などの任意の物体を LiDAR に対して注入することが可能である。

上記の例は、データの注入によるセンサ幻惑攻撃を示したが、LiDAR 原理上では、データを消失させることも可能である。LiDAR の距離測定は、受光波形におい

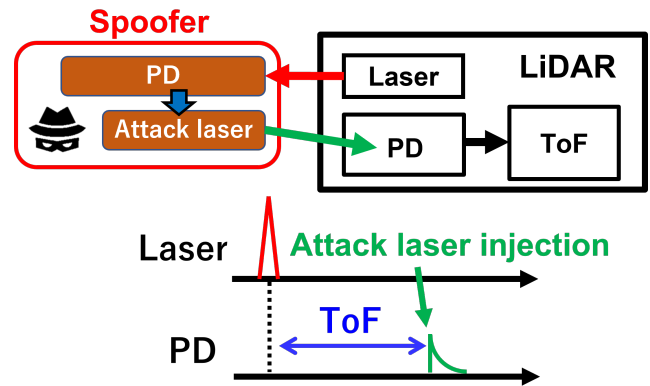


Figure 10. Principle of sensor spoofing attack. The attacker synchronizes with the firing cycle of the LiDAR system and injects false data by launching the attack laser at the right time. The depth at which the false data appears can be changed by adjusting the timing of the launch.

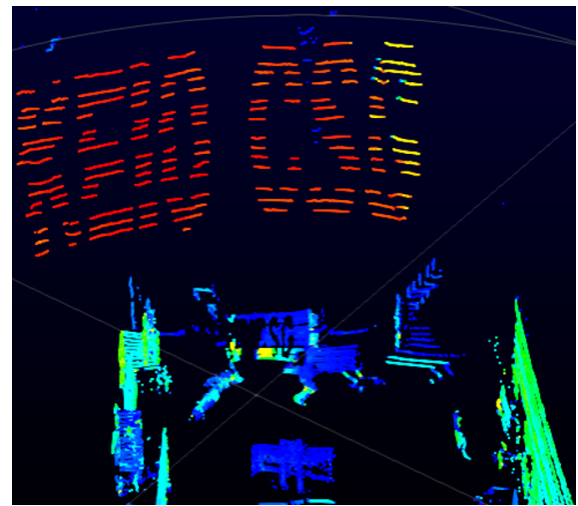


Figure 11. An example of a sensor spoofing attack using a prototype attack device developed by our research group. Data can be injected at arbitrary coordinates, and here the letters KEIO CSG are injected in the hollow.

てピークを検出し、最大ピークに対する ToF を計算するのが一般的である。しかし、LiDAR が射出したレーザよりも強いレーザが、センサ幻惑装置から打ち込まれると、ピークとして検出されるのは、センサ幻惑のレーザであり、結果として、センサ幻惑装置が射出するレーザによって、物体のデータが消失してしまう。このような攻撃は、自動運転車の対人や対物事故を誘発させる可能性があり、非常に大きな脅威である²²⁾。

5 今後の発展動向とまとめ

信頼される自動運転システムを構築するために欠かせない LiDAR センサについて高解像度化とセキュリティの 2 面から考察した。まず高解像度化に関しては LiDAR 黎明期に登場した第一世代 LiDAR からシステムをチップ上に集積しコストと性能を大きく改善した次世代 LiDAR についてレビューを行った。特に次世代 LiDAR の主な進歩要因を受光素子、読み出し回路、及び信号処理部の集積化と捉えた。加えて LiDAR セキュリティ研究、特にセンサ幻惑攻撃に関する最新動向を紹介し、防御機構についても議論した。

今後の LiDAR の発展には、商用と研究で大きく 2 つの方向性がある。商用商用では、3D インテグレーションや

より微細プロセスを用いることで、さらに SPAD 性能や DSP 性能を向上させることで、車載 LiDAR の性能の発展が見込まれる。そして、信頼性や量産性が十分に確保された場合、市販車の ADAS システムに搭載される日も遠くないと考えられる。また研究としては 1550nm LiDAR に大きな可能性が残されている。1550nm LiDAR では単純な dToF ではなく FMCW 方式が活用されており、センサ幻惑に対する耐性も高いことから期待が集まっている²³⁾。またシリコンフォトリソグラフィを用いてレーザを走査する LiDAR は送信側のレーザ走査をも solid-state 化することが期待され研究の発展動向に注目している。加えて 1550nm LiDAR の FMCW 方式は単純な dToF よりも複雑であり、センサ幻惑攻撃も難しい。そのためセキュリティ向上にも一役買うと考えられる。

このようなセンサ幻惑攻撃を本質的に防ぐためには、LiDAR が受光した信号が自身が発したレーザか、それとも他の筐体が発射したレーザかを区別する機構が必要である。そのような防御機構として、高い分別能力が期待されるのは、レーザの群の出射間隔に情報を埋め込むレーザフィンガープリント方式である。この方式では、信号処理機構を設けて、レーザ出射間隔が一致するレーザ群以外をフィルタすることで、上記のような単純なセンサ幻惑攻撃を防ぐことができると期待される。しかし、この方式は、レーザパワーを増加させることにつながるため、LiDAR の性能に悪影響を与える課題がある。そのため、センサ幻惑の防御と LiDAR 性能を両立するシステムの研究は、今後の推進価値が高いと考えられる。

謝辞

本研究は JST CREST program Grant JPMJCR21D2, Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) KAKENHI, Grant 21K20413, JST PRESTO program Grant JPMJPR22PA によってサポートされた。

References

- 1) National Police Agency. Traffic Accident Statistics. https://www.npa.go.jp/publications/statistics/koutsuu/toukeihyo_e.html. Accessed: 2022-2-2.
- 2) SAE. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/. Accessed: 2022-2-2.
- 3) Velodyne. VELODYNE'S HDL-64E: A HIGH DEFINITION LIDAR™ SENSOR FOR 3-D APPLICATIONS. http://velodynelidar.com/docs/papers/HDL%20white%20paper_OCT2007_web.pdf. Accessed: 2022-2-2.
- 4) D. Hall. High Definition LiDAR System, US Patent No. 8767190.
- 5) T. Mitomo, N. Ono, H. Hoshino, Y. Yoshihara, O. Watanabe, and I. Seto: IEEE journal of solid-state circuits **45** (2010) 928.
- 6) C. Niclass, M. Soga, H. Matsubara, S. Kato, and M. Kagami: IEEE Journal of Solid-State Circuits **48** (2012) 559.
- 7) K. Yoshioka, H. Kubota, T. Fukushima, S. Kondo, T. T. Ta, H. Okuni, K. Watanabe, M. Hirono, Y. Ojima, K. Kimura, et al.: IEEE Journal of Solid-State Circuits **53** (2018) 3026.
- 8) S. Kondo, H. Kubota, H. Katagiri, Y. Ota, M. Hirono, T. T. Ta, H. Okuni, S. Ohtsuka, Y. Ojima, T. Sugimoto, et al.: IEEE Journal of Solid-State Circuits **55** (2020) 2866.
- 9) T. T. Ta, H. Kubota, K. Kokubun, T. Sugimoto, M. Hirono, M. Senogoku, H. Katagiri, H. Okuni, S. Kondo, S. Ohtsuka, et al.: 2020 IEEE Symposium on VLSI Circuits, 2020, pp. 1–2.
- 10) O. Kumagai, J. Ohmachi, M. Matsumura, S. Yagi, K. Tayu, K. Amagawa, T. Matsukawa, O. Ozawa, D. Hirono, Y. Shinozuka, et al.: 2021 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), Vol. 64, 2021, pp. 110–112.

- 11) A. R. Ximenes, P. Padmanabhan, M.-J. Lee, Y. Yamashita, D.-N. Yaung, and E. Charbon: 2018 IEEE International Solid-State Circuits Conference-(ISSCC), 2018, pp. 96–98.
- 12) Ouster. OS-2. <https://ouster.com/products/scanning-lidar/os2-sensor/>. Accessed: 2022-2-2.
- 13) K. YOSHIOKA: IEICE Transactions on Electronics **E105.C** (2022) 534.
- 14) M. e. a. Montemerlo: Journal of field Robotics **25** (2008) 569.
- 15) C. Niclass, A. Rochas, P.-A. Besse, and E. Charbon: IEEE Journal of Solid-State Circuits **40** (2005) 1847.
- 16) S.-K. Lee, Y.-H. Seo, H.-J. Park, and J.-Y. Sim: IEEE Journal of Solid-State Circuits **45** (2010) 2874.
- 17) A. Elkholy, T. Anand, W.-S. Choi, A. Elshazly, and P. K. Hanumolu: IEEE Journal of Solid-State Circuits **50** (2015) 867.
- 18) T. Sato, Y. Hayakawa, R. Suzuki, Y. Shiiki, K. Yoshioka, and Q. A. Chen: Proceedings of the 2022 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, 2022, pp. 3459–3461.
- 19) Y. Cao, C. Xiao, B. Cyr, Y. Zhou, W. Park, S. Rampazzi, Q. A. Chen, K. Fu, and Z. M. Mao: Proceedings of the 2019 ACM SIGSAC conference on computer and communications security, 2019, pp. 2267–2281.
- 20) R. S. Hallyburton, Y. Liu, Y. Cao, Z. M. Mao, and M. Pajic: 31st USENIX Security Symposium (USENIX SECURITY), 2022.
- 21) H. Shin, D. Kim, Y. Kwon, and Y. Kim: International Conference on Cryptographic Hardware and Embedded Systems, 2017, pp. 445–467.
- 22) Y. Cao, S. H. Bhupathiraju, P. Naghavi, T. Sugawara, Z. M. Mao, and S. Rampazzi: 32nd USENIX Security Symposium (USENIX SECURITY), 2023.
- 23) C. Hao. Varying waveforms across frames in frequency-modulated continuous-wave (fmcw) lidar systems, European Patent Office No. 3936889.