

未来を切り開く光 ——ライダ技術の最前線——

Light Unveiling the Future : The Forefront of LiDAR Technologies

張 超



ライダ (LiDAR: Light Detection And Ranging) は、光を利用して距離を測定し、高精細な 3D 点群を生成する画期的な技術である。本稿では、車載ライダに焦点を当て、その歴史と市場をはじめ、ライダ用光源、ビーム走査技術、相互干渉の回避手法等について解説する。

キーワード: ライダ, 3D 計測, レーザ, 自動運転, ビーム走査, 相互干渉

1. はじめに

近年の産業用ロボットや自動運転車等に、ステレオカメラ⁽¹⁾、レーダ⁽²⁾、構造化照明⁽³⁾、ライダ (Light Detection And Ranging)⁽⁴⁾等の 3D 計測技術が導入されている。この中で、ライダは mm 級の精度で物体の位置を把握でき、構成次第で 360°の視野で車両周囲をカバーし、照明条件に左右されず暗闇でも正確に機能する。ライダ開発の発端は 1961 年に Hughes Aircraft Company が開発したライダの最初のプロトタイプである⁽⁵⁾。これは T.H. Maiman が 694 nm でルビーレーザーの発振⁽⁶⁾に成功した直後のことであった。そして、1960 年代初頭に MIT の研究者らがルビーレーザー光を月面に送り、そのエコー信号を検出したことが報告された⁽⁷⁾。1971 年には、NASA がアポロ 15 号により月面レーザ測距反射器 (LRRR)⁽⁸⁾を月に設置し、ライダを用いて地球-月間の測距に使用した。その後、火星や水星に向かう宇宙船に使用が拡大された。上述の先駆的研究により、レーザを対象物に照射し、そのエコー信号を収集することで、高精細な 3D 点群を構築する可能性が示された。以降、気象学、海洋、地形測量、自動運転等にライダを適用する試みが始まった。本稿では、車載ライダ技術の進展について解説する。

2. 自動運転と車載ライダ

2.1 自動運転

近年、自動運転技術の進歩は目覚ましいが、実はその

歴史は比較的長い。アダプティブクルーズコントロール (ACC)⁽⁹⁾は車間距離を一定に保ちながら、車速を自動調整する技術であり、現在は先進運転支援システム (ADAS)⁽¹⁰⁾中の代表技術である。この ACC の歴史は 1950 年代に遡る。1956 年に R. Teetor がクライスラーのために最初のクルーズコントロールシステムを開発した⁽¹¹⁾。本提案は磁気センサを用いて車速を一定に保つ技術であった。その後、1995 年に三菱のディアマンテにライダが導入された⁽¹²⁾。当時は、レーザを使うと低コストで測距できるとされていた。ところが、モノリシックマイクロ波集積回路 (MMIC)⁽¹³⁾が低コスト化されると、レーザは霧環境で測定困難であるとか、飛行時間 (ToF) 方式ライダによる相対速度を測るのに最低 2 パルス必要で時間がかかる等の理由が付けられ、これ以降 ACC からレーザは淘汰されるようになった。2000 年代に入ると、米国国防高等研究計画局 (DARPA) が主催する自動運転技術コンテスト DARPA Grand Challenge⁽¹²⁾が注目を集め、出場を目指して車載ライダの開発が活発化した。この中で、Velodyne が DARPA Grand Challenge 2007 用に開発したライダが一躍脚光を浴びた^{(12), (14)}。Velodyne は元来米国のオーディオメーカーで、ライダ開発は社長の趣味として始まった。当該分野で成功を収めた後、オーディオ部門を売却し、ライダに特化した Velodyne LiDAR が設立された。

2.2 車載ライダ

レーダは安価で相対速度を有効に測定できるが、分解能が限定的である。一方、ライダは対候性や ToF 方式における相対速度測定に課題があるものの、高精細で暗闇でも安定した性能を発揮する。特に、自己位置推定と環境地図作成を同時に行う SLAM⁽¹⁴⁾において、360°走査可能な Velodyne LiDAR が威力を発揮し、車載ライダの開発が再び注目されるようになった。このような背

張 超 正員 工学院大学工学部電気電子工学科
E-mail: chao@cc.kogakuin.ac.jp
Chao ZHANG, Member (Faculty of Engineering, Kogakuin University, Hachioji-shi, 192-0015 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.108 No.7 pp.681-686 2025 年 7 月
© 2025 電子情報通信学会

景から、ライドをルーフに搭載した Google カー（現 Waymo）⁽¹⁵⁾ が登場した。ルーフ搭載は一般乗用車への適用が難しいものの、世界的に注目され、車載ライドの開発がますます活発化した。レーダは分解能が低く、物体形状や詳細位置の把握が難しいため、L3 以上の自動運転ではライドの重要性が増した。そして、2010 年代からライドは商用自動車に導入され始めた。例えば、Audi A8 には Valeo LiDAR が搭載され⁽¹⁶⁾、L3 で初めて量産車にライドを提供するメーカーとして Valeo は一躍有名になった。当時は L3 で走行する法律が整備されていないため、技術報告のみであったが、後にホンダがレジェンドに Valeo LiDAR を搭載し⁽¹⁷⁾、車載ライドの商用化が進んだ。2020 年代には、車載ライドは高級 EV で人気を博している。レーダは上述以外に一般道におけるマルチパスの課題⁽¹⁸⁾もあり、ライドはこのような環境でも有利である。また対候性に関しては、ライドは雨の影響は少ないものの、雪には課題があるが、積算によるデータ処理等で対処し、対候性への懸念は薄れてきている。近年では Innoviz LiDAR が BMW や VW に採用され⁽¹⁶⁾、40 億ドルの巨額契約が結ばれている。

2.3 車載ライドの世界市場

現在世界には 100 社以上の車載ライド企業が存在する。北米は車載ライドの商用化に先鞭をつけ、2010 年代前半にはシリコンバレーの多くの自動運転企業は機械回転式 Velodyne HDL-64E⁽¹⁹⁾を採用した。また、この地域は最も多くのライド企業の新規上場を支えてきた。アジア圏では、特にスマート EV の開発が急増する中で、ライド企業の著しい台頭が見られる。対照的に、欧州は伝統的な大手企業が支配的である。業界は 2022 年に混乱を経験し、ライド先駆者である Quanergy と Ibeo が破産申請したが⁽²⁰⁾、2023 年には中国 EV メーカー間の激しい競争によりライド販売が急増した。現在、ライドの世界市場の主要プレーヤーには、欧州の Valeo、北

米の Luminar と Ouster、アジアの Hesai, RoboSense, Seyond, 中東の Innoviz が含まれる⁽¹⁶⁾。車載ライドは走査レーザ、受光器、光学系、集積回路等で構成される。そして、カメラを含む各種センサやナビゲーションシステムと連携して動作する。機能的には、車載ライドは長距離前方認識を担う主ライドと周辺環境を測定する副ライドに分けられる。両者を組み合わせることで全方向を認識でき、死角を排除する。主ライドに求められる検出範囲は各国地域で 150 m~350 m と異なっており、様々な車両速度制限、自動運転レベル⁽²¹⁾、地域規制によって影響を受ける。

3. ライダの原理

ライドは光検出方式により、ToF⁽²²⁾方式と周波数変調連続波（FMCW）^{(23), (24)}方式に大別される。ToF は投影パルスとエコーパルスの時間差から距離を算出し、LRRR⁽⁸⁾等のライドで最も早く使用された技術でもある。現在、ほとんどのライドメーカは、簡易性と低コストに着目して ToF 方式に傾倒している。一方、FMCW は周波数掃引された送信光と戻ってきた光を干渉させることで、移動物体の距離と速度を測定する。

3.1 飛行時間型ライド

ToF LiDAR では、短パルス光を測定対象へ投影する。レーザ光には、可視光や赤外線等、様々な波長の光が使用される。そして、反射光の一部は受光素子によって検出される。ToF では、レーザ光が発射されてから反射光が戻ってくるまでの時間（飛行時間）を計測する。飛行時間 t は、 $L=ct/2$ のように光速 c を考慮して距離 L に換算される。点測定型ライドでは、複数パルスを連続的に発射すると同時にビームが走査され、各々の反射光による測距を行うことで、対象物の 3D 形状を詳細に把握することができる。得られたデータは点群として統合され、デジタル領域で 3D モデルとして表示される。

3.2 周波数変調連続波型ライド

FMCW 方式は、連続波を使用して距離を計測する。まず、光周波数が連続的に変化するレーザ光を対象物に向けて発射する。反射されたレーザ光は、ライドシステム内の受光素子によって検出されるが、発射されたレーザ光と反射されたレーザ光の周波数差を計測する。この周波数差は対象物までの距離に比例する。周波数差 f と周波数掃引幅 B を用いて、 $L=cTf/2B$ 対象物までの距離を算出する。なお、 T は周波数掃引周期を表す。

用語解説

マルチジャンクション技術 半導体レーザのマルチジャンクション技術は、複数の PN 接合を積層することで、効率と性能を向上させる技術である。これにより、少ない電流で高い光出力を実現し、熱負荷を低減することができる。

音響光学素子 RF 駆動信号を音響光学素子に印加すると、結晶内に音響進行波が発生する。光弾性効果により、音響列が屈折率に回折格子に類似する周期的変化をもたらす。強度変調やビーム位置の電気的制御のために使われる。

コヒーレント受信機 コヒーレント検波は、光通信システムにおいて、光信号の位相や振幅、偏波等を取得する手法である。本手法の基本原理は、受信側で光信号と局部発振（LO: Local Oscillator）光を干渉させる。この干渉により、信号の光信号の位相、振幅、偏波等の情報を抽出できる。

4. ライダ用光源

商用ライダには様々な光源が用いられている。1.5 μm 帯ファイバレーザは、長距離検出においてその効果が際立っている⁽²⁵⁾。これは1.4 μm より長波長側は網膜セーフであるため、光出力制限を高く設けられるからである。1,550 nm ToF 方式を採用している商用の車載ライダにはLuminar Iris や Seyond Falcon 等がある。このような光源を導入したライダは測量範囲と分解能に優れるが、光源及び InGaAs 光検出器のコスト、高出力による放熱、信頼性リスク、集積化等において課題を抱えている。

一方、中・長距離においては、905 nm 端面発光レーザ (EEL)⁽²⁶⁾ が、ファイバレーザよりも低コストであり、集積化が容易である。OSRAM 905 nm トリプルジャンクション型 EEL⁽²⁷⁾ は、その温度安定性で知られており、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) ミラーと組み合わせることで、第1世代のハイブリッドライダで成功を収めた⁽²⁸⁾。そして、より高効率な光検出器の台頭により、905 nm ライダの測距範囲が大幅に改善された。EEL は 2D MEMS と組み合わせることで、Robosense RS-LiDAR-M1 や MX 等に代表される商業的な成功を収めており、月産数万台以上の量産を実現している⁽²⁹⁾。2021 年後半にリリースされた Sony IMX459 スタック型 SPAD 距離センサは 24% の高い光子検出効率を有し、フラッシュ型ライダ用センサとして人気を集めている。

短距離ライダ、携帯電話、消費者向けデバイスの 3D 計測においては、垂直共振器型面発光レーザ (VCSEL)⁽³⁰⁾ が最初に適用され、Philips, Lumentum, Coherent, AMS OSRAM によって先駆けられた。VCSEL は EEL と比較して以下の利点を持つ。例えば、モノリシックで一次元/二次元アレーを容易に形成できるため信頼性が高く、また各素子にアドレス可能な柔軟性を有すること、温度依存性 (0.07 nm/°C) が EEL の 1/10 であること、単純な光学系に由来する円形ビーム、簡易なパッケージング、大量生産において確立された 6 インチ GaAs ファウンドリーによる高いコスト効率等が挙げられる。ただし、VCSEL は出力密度と輝度において課題を抱えている。この課題に対して、マルチジャンクション技術^(用語)の導入により、VCSEL の出力密度とエネルギー変換効率が大幅に向上し、中・長距離ライダへの適用における従来のボトルネックが克服されたように思われる。例えば、Lumentum 905 nm 5 ジャンクション型 VCSEL は Hesai AT128 に使用されている。更に、近年では、新デバイスとして Antireflective (AR) VCSEL⁽³¹⁾が登場し、ビーム発散の低減と輝度の向上等と性能が著しく改善された。AR-VCSEL の導入により、905 nm/940 nm においてライダの測距範囲と

分解能が更に向上し、車載ライダの求める測距範囲をカバーできる。AR-VCSEL は 2021 年に開発され、最近商用の長距離ライダに採用されている。

5. ビーム走査

5.1 MEMS

完全機械式のライダは、L2/L3 の ADAS においては姿を消しつつある。業界ではハイブリッドソリッドステート方式が主流となっている。ハイブリッドソリッドステートライダのメーカーは、当初 1,550 nm ファイバレーザや 905 nm EEL 等による点計測を 2D MEMS やミラーと組み合わせて成功を収めた。最近の研究では、高密度 2D MEMS ビーム走査方式が提案されている⁽³²⁾。MEMS 走査の主要要素は、ビーム走査軌跡、サンプリング、グリッド化である。本提案では、リサージュ走査モードにおいてビーム走査軌跡に依存しないようにサンプリングを改良し、サンプリング点をデカルト座標のグリッドに載せ、同一走査周波数でデカルト座標上により密な点群をプロットできる。計算及び実験では、既存のサンプリング方式と比べて、同一ハードウェア構成及び走査周波数で、分解能とフレーム当りの点の数が倍増した。

5.2 ソリッドステートと機械走査の組合せ

一方、最近の注目されているやり方は、ソリッドステートで光電的に 1 軸走査し、ミラーでもう片方の軸を機械走査する構成である。ここで用いられる光源は、小形の VCSEL/AR-VCSEL チップ (例: Hesai AT128⁽³³⁾) や VCSEL/AR-VCSEL 狭アレーの列で構成される。このような技術変遷により、モータを 2 個から 1 個に削減できる。つまり、2D MEMS 方式におけるレーザビームの緻密なアラインメントを伴わず、視野も MEMS 走査より広い。例えば、垂直に連なるマルチジャンクション AR-VCSEL 狭アレーを水平回転する走査では、AR-VCSEL の低ビーム発散により高い水平分解能が得られる。総出力は垂直アレーの長さを延ばすことで向上する。なお、垂直分解能は受光器サイズと密度によって決まる。

VCSEL に限らず、EEL やファイバレーザもハイブリッドソリッドステートライダに組み込むことができる。上述したように、EEL は MEMS と組み合わせることで既に商業的な成功を収めた。今後数年間で、EEL と AR-VCSEL を用いたライダ間の競争が予想される。低コストの EEL LiDAR は光源個数を最小限に抑え、追加レンズで視野を広げる。一方、AR-VCSEL はデバイス面積を縮小し、出力パワー密度と輝度の面で有利である。性能面では、EEL LiDAR は通常 200 m の制限があるが、昨今の 6 ジャンクション型 AR-VCSEL を用いたライダはこの範囲を超え、8~10 ジャンクションへの拡張によ

り 300~400 m に達することが期待されている。更に、VCSEL の低コスト性により、EEL と比較して AR-VCSEL は長期にわたり優位に立つことが想定される。

5.3 波長掃引及び空間分散

ソリッドステートライダにおいて、全ての素子を Si チップへ集積することが一つの目標となっている。波長可変光源を用いてビームステアリングを実装することは、簡易で効果的である。しかし、限られた材料と導波路の分散が原因で、狭い波長掃引帯域でステアリング角度を拡大させることが課題である。そこで、SOI (Silicon on Insulator) 導波路において、二つの TE 偏波が逆方向に伝搬するソリッドステートライダが提案されている⁽³⁴⁾。単一のグレーティングカップラから伝搬してくる一対のビームをシームレスにつなげることで、ビームステアリング角度を 2 倍にできる。更に、波長分割多重されたレーザアレーを用いて、互いに逆方向に伝搬する TE 偏波用の安価なソリッドステートライダが開発されている。

このほかに、波長掃引光源そのものも非機械式にして、回折格子と組み合わせることで 1 軸完全非機械式のチャープ振幅変調位相シフトライダが報告されている⁽³⁵⁾。

5.4 音響光学素子

単一の GHz 音響光学素子^(用語)のみを使用してビームを 1 軸走査するオンチップ音響光学ビームステアリングが報告されている⁽³⁶⁾。異なる角度でステアリングされたビームが固有の周波数シフトでラベル付けされるブリュアン散乱を利用し、1 台のコヒーレント受信機^(用語)を用いて周波数領域で測定物体を角度分解する。本ライダは、視野角 18°, 角度分解能 0.12°, 最長 115 m で FMCW 測距する。音響光学素子をアレー化することで、広い 2D 視野を有する小形で安価な周波数角度分解ライダが期待できる。

5.5 液晶素子

同軸配置されたロッドレンズと同心円状のグレーティングカップラ (CGC: Concentric grating coupler) を組み合わせた非機械式走査法が提案されている⁽³⁷⁾。レンズの中心軸に沿って内側の CGC の中心に垂直に入射されたレーザ光は、外側の CGC から放射され、レンズの側面を通過する。そして、CGC を挟む二つのエリア分割電極層と CGC 上に形成された液晶層に電圧を印加することによって、2 軸走査を実現する。実験では水平 360° 垂直 10° の範囲で走査が実証された。この液晶制御による 2 軸走査機構は、水平範囲が 360° で、最小 0.3°×0.8° の広がり角を持つビームが垂直範囲 10° を最高 100 Hz で走査する。

5.6 メタサーフェス

過去 10 年間にわたり、メタサーフェス (MS) は光の振幅、位相、光周波数、偏波を利用して高性能デバイス形成できることから、世界的に注目を集めてきた⁽³⁸⁾⁻⁽⁴⁰⁾。MS はサブ波長サイズと周期性を持つ散乱物であるメタアtomの配置で構成される平面光学素子である。現在 MS に関して、共鳴位相遅延 (共鳴ナノ粒子による光散乱制御)、伝搬位相遅延、幾何学的位相 (例: Pancharatnam-Berry 位相によるナノフィン構造の回転⁽⁴¹⁾等) の複数の位相遅延方式について研究されている。一般的に MS は定められた光学機能を実現する受動素子である。例えば、メタアtomのサイズと間隔を適切に選定することで、MS は一般化スネル則 (GSL) によって任意の固定角度でレーザ光を偏向させる。近年では、外部刺激によってトリガされる多機能性を備えたプログラマブルな能動型 MS の研究が活発に行われ、レーザ光を動的操作できることから、次世代ライダ用ビーム走査法として期待されている。最近、米国スタートアップ Lumotive は、液晶 MS 及び Si 加工を用いることで性能と製造効率の向上を達成すると同時に、広視野角と高分解能、高フレームレートを実現した⁽⁴²⁾。その共鳴サブ波長素子は 120° をビーム走査する。本アプローチは小形でありながら性能の拡張が期待できる一方、電気部の簡易化が求められ、金属 MS 構成要素の場合、光損失が大きい可能性がある。これに対して、MS でライダ視野を 150°×150° に拡大し、低/高分解能のマルチゾーンイメージングを同時に実現する高速ビーム走査法が報告された⁽³⁸⁾。本技術は、音響光学偏向素子と伝搬位相遅延方式のマルチビーム偏向 MS を組み合わせ、ビーム走査、動作波長、材料等の自由度が高い。

5.7 光フェイズドアレー

過去数十年にわたり、ナノフォトニクス技術がライダに導入され、高度な走査及び検出技術が開発されてきた。ADAS や車載ライダの普及が予想される中、走査システムには、製造の簡易性、スケーラビリティ、コスト、軽量、耐振性等の新たな課題が浮上している。昨今の産業ライダは主にマクロ的な機械走査方式によって 360° をカバーしてきた。このような測距は広視野を有する一方、走査速度が数十 Hz に制約される。今後の機械走査としては kHz 級の MEMS が期待されているが、MEMS は水平 25°/垂直 15° を上回るには追加技術や構成の煩雑化が伴う。産業的に成熟している液晶変調器は、視野角が波長に応じて通常 20° 未満で、変調周波数は kHz 級であり、ライダ走査機構として引き続き研究開発が求められる。更に、MHz 級の走査を可能にする音響光学技術は、一般的に視野角が数度であるため、ライダへ適用するために他技術との組合せが検討されている。光フェイズドアレー⁽⁴³⁾は光集積回路技術の進展とと

もに、1980～1990年代から多くの研究者が可能性を探求し始めた。ライド走査として注目されており、60°の視野角を達成しながら驚異的な走査速度を実現できる。しかし、光フェイズドアレーは製造精度に対する要求が高く、消費電力の観点からも大量生産に課題が残っている。最近ではSiN等の材料を用いることで、製造誤差を減らし、性能を向上させる研究が進んでいる⁽⁴⁴⁾。

6. 相互干渉の回避

6.1 通信技術の適用

ライドはリアルタイムで高精細な3Dマッピングを実現でき、L3以上の自動運転に不可欠なセンサとなりつつある。ところが、通信と同様に、時間領域または周波数領域でチャネルの重畳による相互干渉が指摘されている。これにより個々のライドの許容チャネル数を制限し、動作するデバイスの密度も制限する必要が出てきている。本課題はライドの高いコストと相まって、ライドの普及を妨げている。これまで本課題に対処するために、通信技術をライドに適用する研究が多く行われた。例えば、無線通信では符号分割多重接続(CDMA)が各ユーザに固有の準直交符号系列を割り当て、スペクトル利用効率を向上させ、チャネル間クロストークを低減させている⁽⁴⁵⁾。同様に、レーダではMIMO(Multiple-Input Multiple-Output)技術で複数の送信アンテナから直交信号を送信し、受信アンテナの混信した波形から元の信号を抽出できる。これまでMIMO LiDARも報告されている⁽⁴⁶⁾。しかし、CDMAの擬似ランダム変調には高速変復調が必要であり、MIMOプロセッサには計算量的負荷が伴う。

6.2 レーザカオスの導入

そこで、カオスライド⁽⁴⁷⁾が提案され、レーザの動的特性を利用してカオス変調光を生成して直交符号における消費電力を削減できる。しかし、カオス変調光の生成には外部フィードバックが必要であるため、リアルタイム性が低い。本課題を解決するために、カオス光周波数コムを用いたライド⁽⁴⁸⁾が提案された。この超並列カオス光源は、固有のカオス性により各チャネルに直交性を持たせ、ライド応用において高い相互干渉耐力を実現できる。微小光共振器におけるKerrコムの不安定性により、CWレーザで励起されたコム状態は時空間的なカオス性を示し、各コムラインは直交しているため、時間領域及び周波数領域のどちらで信号が重畳しても区別できる。高非線形AlGaAsOI微小リング共振器を用いることで、12GHzを超えるカオススペクトルが観測され、2mmの測距精度、速度5mm/s未満であるものの、測定対象物の低速移動が検出された。そして、計51本の光周波数コムを用いて3D点群を取得した。レーザカオ

スに由来する直交性により、システム構成は簡易であり、送光側では単一光源のみが用いられ、受光側では多重化デバイスを使用せず、一対の光検出器のみで相互干渉を回避できる。また、使われるデバイスは集積でき、ウェーハスケールの小形集積ライドに展開して量産につなげることも期待できる。このカオスライドでは、受光信号より30dB強い干渉光が混信しても適切なSNRを維持できる。

7. おわりに

本稿では、車載ライドについて、自動運転を含むその歴史的変遷、市場、光源、ビーム走査、相互干渉の回避について述べた。L3以上の自動運転において、ライドは不可欠なセンサとしての地位を確立しつつある。世界には車載ライドだけで100社を超える企業が存在し、熾烈な競争を繰り広げているが、同じサプライヤに依存した開発によって生み出された商用ライドは、似たり寄ったりであるように感じられる。超小形ライド製品も登場しているが、その性能はしばしば半減している。このような状況を打破するためには、3～6節で紹介したような科学的視点や材料の視点からの技術革新が必要なのではないだろうか。ただ、このような技術革新には標準化という壁が立ちはだかっており、今後の進展に注目したい。

謝辞 本稿を執筆するに当たって、情報共有や研究資金寄付を含む貴重なサポートをして頂いた有限会社Omni360の佐藤秀氏に心より感謝申し上げます。

文 献

- (1) D.B. Gennery, "A stereo vision system for an autonomous vehicle," International Joint Conference on Artificial Intelligence, vol. 2, pp. 576-582, 1977.
- (2) I. Bilik, O. Longman, S. Villeval, and J. Tabrikian, "The rise of radar for autonomous vehicles: signal processing solutions and future research directions," IEEE Signal Process. Mag., vol. 36, no. 5, pp. 20-31, Sept. 2019.
- (3) J. Salvi, J. Pages, and J. Batlle, "Pattern codification strategies in structured light systems," Pattern Recognit., vol. 37, no. 4, pp. 827-849, April 2004.
- (4) Y. Li and J. Ibanez-Guzman, "Lidar for autonomous driving: the principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems," IEEE Signal Process. Mag., vol. 37, no. 4, pp. 50-61, 2020.
- (5) G. Smith, "The early laser years at hughes aircraft company," IEEE J. Quantum Electron., vol. 20, no. 6, pp. 577-584, 1984.
- (6) T.H. Maiman, "Stimulated optical radiation in ruby," Nature, vol. 187, no. 4736, pp. 493-494, 1960.
- (7) L.D. Smullin and G. Fiocco, "Optical echoes from the moon," Nature, vol. 194, no. 4835, 1962.
- (8) C.O. Alley, R.F. Chang, D.G. Currie, S.K. Poultney, P.L. Bender, R.H. Dicke, D.T. Wilkinson, J.E. Faller, W.M. Kaula, G.J.F. MacDonald, J.D. Mulholland, H.H. Plotkin, W. Carrion, and E.J. Wampler, "Laser ranging retro-reflector: continuing measurements and expected results," Science, vol. 167, no. 3918, pp. 458-460, 1970.
- (9) L. Xiao and F. Gao, "A comprehensive review of the development of adaptive cruise control systems," Veh. Syst. Dyn., vol. 48, no. 10, pp. 1167-1192, 2010.
- (10) K. Bengler, K. Dietmayer, B. Farber, M. Maurer, C. Stiller, and H.

- Winner, "Three decades of driver assistance systems : review and future perspectives," IEEE Intell. Transp. Syst. Mag., vol. 6, no. 4, pp. 6-22, 2014.
- (11) P. Fancher, R. Ervin, J. Sayer, M. Hagan, S. Bogard, M. Mefford, and J. Haugen, "Intelligent cruise control field operational test," National Highway Traffic Administration, U.S. Department of Transportation, no. UMTRI-97-11, 1998.
- (12) U. Ozguner, C. Stiller, and K. Redmill, "Systems for safety and autonomous behavior in cars : the DARPA grand challenge experience," Proc. IEEE, vol. 95, no. 2, pp. 397-412, 2007.
- (13) R.A. Pucel, "Design considerations for monolithic microwave circuits," IEEE Trans. Microw. Theory Tech, vol. 29, no. 6, pp. 513-534, 1981.
- (14) F. Moosmann and C. Stiller, "Velodyne SLAM," IEEE Intell. Veh. Symp. Proc., pp. 393-398, June 2011.
- (15) S.L. Pocster and L.M. Jankovic, "The google car : driving toward a better future?" J. Bus. Case Stud., vol. 10, no. 1, pp. 7-14, 2014.
- (16) F. Zhao, H. Jiang, and Z. Liu, "Recent development of automotive LiDAR technology, industry and trends," SPIE International Conference on Digital Image Processing, vol. 11179, pp. 1132-1139, Aug. 2019.
- (17) H.M. Eraqi, M.N. Moustafa, and J. Honer, "Dynamic conditional imitation learning for autonomous driving," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 23, no. 12, pp. 22988-23001, 2022.
- (18) S. Sun, A.P. Petropulu, and H.V. Poor, "MIMO radar for advanced driver-assistance systems and autonomous driving : advantages and challenges," IEEE Signal Process. Mag., vol. 37, no. 4, pp. 98-117, 2020.
- (19) R. Halterman and M. Bruch, "Velodyne HDL-64E lidar for unmanned surface vehicle obstacle detection," SPIE Unmanned Systems Technology XII, vol. 7692, 2010.
- (20) D. Liang, C. Zhang, P. Zhang, S. Liu, H. Li, S. Niu, R.Z. Rao, L. Zhao, X. Chen, H. Li, and Y. Huo, "Evolution of laser technology for automotive LiDAR, an industrial viewpoint," Nat. Commun., vol. 15, no. 1, 7660, 2024.
- (21) R. Stone and J.K. Ball, "Automotive engineering fundamentals," SAE International, 2004.
- (22) C. Mallet and F. Bretar, "Full-waveform topographic lidar : state-of-the-art," J. Photogramm. Remote Sens., vol. 64, no. 1, pp. 1-16, 2009.
- (23) B. Behroozpour, P.A.M. Sandborn, M.C. Wu, and B.E. Boser, "Lidar system architectures and circuits," IEEE Commun. Mag., vol. 55, no. 10, pp. 135-142, 2017.
- (24) C. Zhang, T. Nagata, M.S.B. Ahmad Sharifuddin, F. Ito, A. Nakamura, and Y. Koshikiya, "Long-range frequency-modulated continuous-wave LiDAR employing wavelength-swept optical frequency comb," Opt. Commun., vol. 545, 129702, 2023.
- (25) G. Canat, L. Lombard, A. Dolfi, M. Valla, C. Planchat, B. Augère, P. Bourdon, V. Jolivet, C. Besson, Y. Jaouën, S. Jetschke, S. Unger, J. Kirchhof, E. Gueorguiev, and C. Vitre, "High brightness 1.5 μ m pulsed fiber laser for lidar : from fibers to systems," Fiber and Integr. Opt., vol. 27, no. 5, pp. 422-439, 2008.
- (26) Y. Fan, H. Zhang, J. Yang, P. Wang, W. Zhang, Y. He, X. Tian, T. Fu, G. Zhang, C. Zah, and X. Liu, "905 nm line-beam laser module with high reliability for automotive LiDAR applications," SPIE High-Power Diode Laser Technology XXI, vol. 12403, 2023.
- (27) B.D. Padullaparthi, "Automotive LiDARs," VCSEL Industry : Communication and Sensing, Chap. 6, John Wiley & Sons, Inc., 2021.
- (28) D. Yang, Y. Liu, Q. Chen, M. Chen, S. Zhan, N. Cheung, H.Y. Chan, Z. Wang, and W.J. Li, "Development of the high angular resolution 360 LiDAR based on scanning MEMS mirror," Sci. Rep., vol. 13, no. 1, 1540, 2023.
- (29) 田中秀治, "車載 MEMS の最前線," 信学誌, vol. 107, no. 11, pp. 1036-1041, Nov. 2024.
- (30) R. Michalzik, "VCSEL fundamentals," in VCSELs : Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, Chap. 2, pp. 19-75, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2012.
- (31) C. Zhang, H. Li, and D. Liang, "Antireflective vertical-cavity surface-emitting laser for LiDAR," Nat. Commun., vol. 15, no. 1, 1105, 2024.
- (32) J. Wang, G. Zhang, and Z. You, "Improved sampling scheme for LiDAR in Lissajous scanning mode," Nature Microsyst. Nanoeng., vol. 8, no. 64, 2022.
- (33) Y. Hayakawa, T. Sato, R. Suzuki, K. Ikeda, O. Sako, R. Nagata, Q.A. Chen, and K. Yoshioka, "WIP : an adaptive high frequency removal attack to bypass pulse fingerprinting in new-gen LiDARs," Network and Distributed System Security (NDSS) Symposium, 2024.
- (34) Y. He, Q. Wang, X. Han, Z. Wang, W. Geng, Y. Fang, Z. Pan, and Y. Yue, "Solid-state lidar with wide steering angle using counter-propagating beams," Sci. Rep., vol. 13, no. 1, 15945, 2023.
- (35) Z. Zhang, C. Zhang, T. Shirahata, S. Yamashita, and S.Y. Set, "Overall non-mechanical spectrally steered LiDAR using chirped amplitude-modulated phase-shift method," J. Lightwave Technol., vol. 40, no. 7, pp. 1902-1913, 2021.
- (36) B. Li, Q. Lin, and M. Li, "Frequency-angular resolving LiDAR using chip-scale acousto-optic beam steering," Nature, vol. 620, no. 7973, pp. 316-322, 2023.
- (37) S. Nishiwaki, "Biaxial 360-degree scanning LIDAR using a liquid crystal control," Sci. Rep., vol. 11, no. 1, 14767, 2021.
- (38) R.J. Martins, E. Marinov, M.A.B. Youssef, C. Kyrou, M. Joubert, C. Colmagro, V. Gâté, C. Turbil, P.-M. Coulon, D. Turover, S. Khadir, M. Giudici, C. Klitis, M. Sorel, and P. Genevet, "Metasurface-enhanced light detection and ranging technology," Nat. Commun., vol. 13, no. 1, 5724, 2022.
- (39) C. Jung, E. Lee, and J. Rho, "The rise of electrically tunable metasurfaces," Science Adv., vol. 10, no. 34, eado8964, 2024.
- (40) S.T. Ha, Q. Li, J.K. Yang, H.V. Demir, M.L. Brongersma, and A.I. Kuznetsov, "Optoelectronic metadevices," Science, vol. 386, no. 6725, eadm7442, 2024.
- (41) 山下和真, "モルフォ蝶のナノ構造に学ぶ新たな光拡散材の開発," 大阪大学博士論文, 2024.
- (42) C. Rablau, "LiDAR—A new (self-driving) vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences," Conference on Education and Training in Optics and Photonics, paper 11143-138, 2019.
- (43) J. Sun, E. Timurdogan, A. Yaacobi, E.S. Hosseini, and M.R. Watts, "Large-scale nanophotonic phased array," Nature, vol. 493, no. 7431, pp. 195-199, 2013.
- (44) C. Sun, B. Li, W. Shi, J. Lin, N. Ding, H.K. Tsang, and A. Zhang, "Large-scale and broadband silicon nitride optical phased arrays," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 28, no. 6, 8200710, 2022.
- (45) T. Fersch, R. Weigel, and A. Koelpin, "A CDMA modulation technique for automotive time-of-flight LiDAR systems," IEEE Sens. J., vol. 17, no. 11, pp. 3507-3516, 2017.
- (46) J.D. Chen, K.W. Wu, H.L. Ho, C.T. Lee, and F.Y. Lin, "3-D multi-input multi-output (MIMO) pulsed chaos lidar based on time-division multiplexing," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 28, no. 5, 0600209, 2022.
- (47) F. Lin and J. Liu, "Chaotic lidar," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 10, no. 5, pp. 991-997, 2004.
- (48) R. Chen, H. Shu, B. Shen, L. Chang, W. Xie, W. Liao, Z. Tao, J.E. Bowers, and X. Wang, "Breaking the temporal and frequency congestion of LiDAR by parallel chaos," Nat. Photon., vol. 17, no. 4, pp. 306-314, 2023.

(2025 年 2 月 28 日受付 2025 年 3 月 14 日最終受付)



ちょう ちょう
張 超 (正員)

平 19 岡山大・工卒。平 21 東大大学院修士課程了。令 2 東大大学院博士課程了。平 25 南洋理工大・助手。平 28 アンリツ株式会社技術者。令 2 東大先端研特任研究員。令 3 島根大・総合理工・助教。令 7 工学院大・工・准教授。令 3 から現在まで東大先端研客員研究員。マイクロ波工学、光通信、光量子工学、光計測の研究に従事。IEEE, SPIE, 応用物理学会各会員。