

ライダー技術の発展と産業応用

平野 嘉仁

三菱電機株式会社 (〒100-0031 東京都千代田区丸の内 2-7-3)

Progress of LIDAR technology and its industrial application

Yoshihito HIRANO

Mitsubishi Electric Corporation, 2-7-3, Marunouchi Chiyoda-ku, Tokyo 100-8310

(Received February 20, 2021)

Regarding the progress of LIDAR technology and its industrial application, I describe my experiences for the last 30 years and the latest technical progress of newly commercialized “LiDAR”. With the maturity of LIDAR technology and the clarification of social needs, I hope that LIDAR will make a leap forward as a “remote sensing technology that makes invisible things visible” and that our traditional Laser Radar Society of Japan will be activated.

最近、世間で“LiDAR”という名前が広く知られるようになった。高速・高精度に立体空間を撮影するカメラとして、車の自動運転、ロボットの目、拡張現実（AR）生成などの用途で注目を集めている。最初は、2013年頃、マイクロソフトがゲームなどに用いるモーションセンサ Kinect に、強度変調した反射光の位相から反射点までの距離を取得する iToF (indirect Time of Flight) 方式を導入したことに遡る。イメージセンサの素子毎に位相差を検出する方式は、CMOS カメラとの整合性が高く、高分解能な距離画像を得られるとともに、比較的安価であることから、その後、深度測定、暗所でのオートフォーカス、顔認証といった用途でスマートフォンに搭載されるようになってきた。更に、昨年、光パルスの往復時間から距離画像を取得する dToF (direct Time of Flight) 方式の“LiDAR”スキャナが iPhone に搭載され登場した。長距離、屋外での使用に優れるとして注目にされており、ここに来て、まさに 1 人に 1 台の“LiDAR”時代が到来した。

さて、メイマンがルビーレーザを発振させてから 60 年が経過した。レーザは、人類がレーザ応用技術に新天地を求め開発を進めた結果、通信、加工、ストレージ、計測、医療、照明といった産業分野で、社会に欠かせないものとなっている。この中で、レーザ光をターゲットに照射して、ターゲット

から反射や散乱で戻ってきた光の情報を取得するライダー計測も、測距や大気観測を中心に広範囲の応用に向けて開発が進んできた。本学会の前身であるレーザセンシング（レーザ・レーダ）シンポジウムの 1972 年の第 1 回報告をホームページで眺めると、稲場文男先生や山中千代衛先生などの日本のレーザ界の生みの親を筆頭に、現理事の小林先生や内野氏の名前も拝見できる。高度成長期における大気汚染の計測や、超高層の計測、超長距離（人工衛星）の距離計測など多様な報告がなされており、黎明期における熱気がうかがえる。また、企業からの発表も多く、産業応用への期待感もあったように思われる。さて、その後 50 年間のシンポジウムの変遷をみると、発表件数は 3 倍程度に増えてはいるが、企業からの発表件数はスペースライダーなど一時的なトピックスを除いて増えていないことは残念である。ただ、この間、産業応用への努力が無かったわけではない。手前味噌ではあるが、少し、30 年にわたって私と仲間たちで行った挑戦について述べさせていただく。

本学会での私の最初の発表は 1989 年の福岡で開かれた第 13 回である。もともと光通信デバイスを開発をしていた私は、当時の上長である伊東尚氏から固体レーザの開発を命じられ、スタンフォード大の Byer 教授等により提案された半導体レーザ

(LD) 励起固体レーザーの研究を始めた。LD 励起は、固体レーザーの電気効率をランプ励起に比べ 10 倍近く向上し、熱による出力限界を緩和する。これにより高ビーム品質の高繰返しレーザーが実現可能になるため、高い空間分解能で高速 2 次元測距を必要とするヘリコプタの電線検知などへの応用に向けた LD 端面励起 Nd:YLF レーザの開発結果を発表した。今では平凡な結果だったが、空冷を含め手に載るサイズのレーザーを設計から製作まで 1 人で行ったのは良い経験となった。その後、LD 励起固体レーザーは、その寿命の長さから宇宙での利用が注目され始めた。私も、1990 年後半は、本学会の笹野氏、中島氏、浅井先生、小林先生、内野氏、長澤先生等、多くの皆様にお世話になりながら、“ELISE” 等、衛星搭載ライダー向けに、各種のレーザーシステムを開発させて頂いた。伝導冷却 Nd:YLF レーザや、横基本モード Nd:YAG レーザでは、平均出力の世界記録も達成し、ライダーのプロトタイプの製作まで行ったが、残念ながら実用にはいたらなかった。

1990 年台末になり、高出力の希土類添加光ファイバが登場すると、ライダーの大きさ、価格、信頼性などの改善に向けて、送受信の光学系以外は、光通信用の部品と光ファイバ増幅器で構成した全光ファイバ型ライダーの検討をスタートした。光通信の波長帯 1.5 μm がフィールドで使いやすいアイセーフ波長であることや、コヒーレント光通信用の部品や技術も豊富であったことから、当時、研究所でライダー事業化を模索していた我々は 1.5 μm のコヒーレントドップラーライダー (CDL) の製品化に梶をきった。なかでも風計測は、ヒートアイランド現象や環境影響物質の拡散といった都市環境監視、晴天乱気流や後方乱気流といった航空機の脅威監視、風況調査や到来風を予測しての制御といった風力発電の効率化等、数多くの産業応用テーマが考えられたからである。全光ファイバ型ライダーは、思惑通り比較的簡単に製品化できたが、光ファイバの弱点として、その細いコア径での非線形効果、特に狭スペクトル幅の光伝搬時におこるブリルアン散乱のため、送信ピークパワーに限界があることもわかった。ライダーとして観測距離が数 100 m と短く、広範囲の風況分布をリアルタイムに測定するような用途には使えないのである。その頃、丁度良いタイミングで、高効率な非線形素子である周期分極反転素子 PPLN (Periodic Poled: LiNbO_3) の大口径化が三菱電線の谷口氏等により成され、高出力な光パラメトリック増幅器 (OPA: Optical Parametric Amplifier) への応用を思い立った。最終的に、OPA を全光ファイバ型ライダーに付加し、気象レーダで

使用している高速信号処理装置と組み合わせることで、半径 10 km、360 度周回データを 1 分程度で測定できる設置型 CDL が完成した。当時、本ライダーの最初のユーザである北大の藤吉先生から、リアルタイムで変化する細かい風の動きを可視化して見せて頂いた時には本当に感激した。また、この結果を、当時、小林先生の推薦で CLEO (サンフランシスコ)、浅井先生の推薦で CLRC (アスペン)、それぞれで招待講演させて頂いている。ただ、OPA は励起光源として 1 μm 帯の大型の固体レーザーが別途必要で、製品の小型化・高信頼化に苦勞した。CDL 製品で先行していた競合のロッキード・マーチン社も同様の苦勞があったようで、2005 年頃に、使用するレーザーを、波長 2.1 μm 帯の大型固体レーザーから、光ファイバレーザー励起で小型化・高信頼化に向く波長 1.6 μm 帯の固体レーザーに変更した。我々も、別のタイプの出力増幅器を模索した。当初、光ファイバ増幅器の高出力化に向けて、非線形効果の影響を減じるファイバコア径の拡大やファイバ長の短尺化なども進めたが、抜本的な出力向上までには至らなかった。最終的に、光ファイバ増幅器と同じエルビウム添加ガラスを用い、バルクと 2 次元導波路 (光ファイバ) の中間にあたる平面導波路型増幅器を独自開発することで課題の解決を図った。結果、高出力化により観測距離は半径 30 km 近くまで拡大し、空港の乱気流監視向けに適用可能となった。また、小型化により航空機搭載が可能になり、JAXA (調布) 殿に Boeing 747 での晴天乱気流検出試験を実施いただくに至っている。

その他、CDL 以外の用途で開発した全光ファイバ型ライダーに CO_2 観測 LAS (Laser Absorption Spectrometer) がある。 CO_2 吸収線上の ON/OFF 2 波長に、異なる強度変調周波数を割り当てて 2 波同時・同光路で送信し、変調周波数毎での受信光強度比から長距離パスでの吸収を高精度に測る方式を考案した。開発品は、JAXA (筑波) 殿の航空機搭載実証等で精度検証頂いており、将来の衛星搭載につながることを期待したい。

この後、2010 年頃から始めた開発が、カメラ並みのフレームレートで動作する 3D イメージングライダーである。長距離で高分解能なデータを取得する場合、すべての点を順次スキャンする方法では、飛行時間のためフレームレートが制限される。解決には、複数点同時の測距処理が必要で、1 次元の APD アレイと、その出力を同時に測距データに変換する TDC (Time to Digital Converter) アレイ IC を開発した。この受信モジュールで垂直方向のデータを一括に取得し、水平方向はスキャナでビームを

掃引することで、距離 1.2 km の 3D 画像を 30 フレーム/秒で取得することに成功している。今後、道路、鉄道、航空滑走路などの路面・路線監視、宇宙や海底といった極限環境でのイメージングなどに適用が広がることを期待している。

さて、ここまで、我々の経験で紹介したように、新しい技術の導入によりライダーは着実に進歩し、産業への適用事例も増えつつある。さらに、近年、世界的な SDGs に基づく社会課題解決への意識の高まりから、地球環境保全や気象予測に向けての社会ニーズも高まっているように思う。“遠隔からみえないものを見る技術”として広視野の体積データをリアルタイムで取得できるような高性能なライダーを小型・低コストで提供できるようになれば、ライダーの社会実装がより進むだろう。最後に、これからのライダー技術の進展について考えたい。

冒頭で述べた“LiDAR”は、人が目をつかっておこなってきた認識の仕事を機械が受け持つためのツールとして開発されている。車やロボットの目や、人の視覚認識を AR/VR サイバー空間で共有するためのセンサとしての市場規模は膨大で、実用化には多くの資金とエンジニアリングリソースが投入されている。多くの技術的イノベーション同様、“LiDAR”における今回の非連続な技術進歩も、集積化に優れ、量産化にも適する半導体技術の活用から生まれている。例えば、iPhone に搭載の“LiDAR”では、送信にレーザープリンタなどの量産実績をもつ面発光レーザー（VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser）が、受光に CMOS イメージセンサで培われた高度な製造技術で作られた SPAD（Single Photon Avalanche Diode）が用いられ、生産性や信頼性を担保した上でスマートフォンに搭載可能な低価格も実現している。方式は、機械駆動のない、所謂、フラッシュライダーであり、なんとといっても、センサチップ上で 2 次元のフォトンカウンティングとデジタル演算を行い、距離・強度データを直接出力するのは、まさに半導体設計・製造技術の賜物である。フラッシュ方式以外にも、シリコンフォトニクス技術で製作した光のフェーズドアレイアンテナを用い、電子的に高速ビーム掃引する FM-CW 方式なども開発されているが、小型・高信頼・低コストを実現するのに半導体プロセスを用いているのは共通である。現在、SPAD やシリコンフォトニクスの動作波長領域の拡大も進んでおり、これらの技術導入でライダーの受信器は大きく進化

するだろう。

一方、“LiDAR”とライダーで最も異なるのが送信パワーである。大気散乱を対象とした長距離計測となれば格段に高い送信パワーが要求される。これについて最近のトピックスがあるので簡単にふれておく。一つは、京大の野田先生等の発明であるフォトニクス結晶面発光レーザー（PCSEL: Photonic Crystal Surface Emitting Laser）である。PCSEL は、通常の VCSEL と異なり、レーザー共振が活性層に平行でありながら垂直方向にビームを出射する。このため、広い共振領域の活性層内に蓄積された高いエネルギーが利用可能である。また、垂直方向に出射するビーム形状が共振の光強度分布に比例するため、大口径（～mm）の横基本モードビーム形成が可能である。現在、低次横モードでのエミッタ出力として 70 W と従来の VCSEL の数千倍が報告されているが、理論的には更なる高出力化も期待でき、今後の実証を待ちたい。面発光であるためアレイ化も容易で、ビーム出射方向も設計で変えることができるので、電気的に高出力ビームを掃引できるライダー向きの半導体レーザーが実現できる日も近い。

二つ目は、高エネルギー発生に適した小型固体レーザー技術である。一般に、高エネルギーを扱う固体レーザーでは、損傷を抑えるためにレーザービームの大口径化が有効であり、レーザー素子としてディスク形状が良く用いられる。しかし、ディスクは排熱のために厚みを薄くとる必要があり、蓄積エネルギーが小さくなることから単一素子からの出力が制限されていた。これに対し理研の平等先生等は、複数枚の薄ディスク素子を熱伝導率の高いサファイア冷却板でサンドイッチしながら独自技術で接合した DFC（Distributed Face-Cooled）構造の素子を提案しており、すでに体積数立方センチの超小型素子から J 級の高エネルギー発生を実証している。また、J 級の出力を波長変換可能な大口径の PPLN も同時に実現しており、各種波長のライダーに適用できそうである。アイセーフ波長で出力すれば、超小型で長距離のフラッシュライダーも夢でなくなるかもしれない。

これまで述べてきたように、ライダー技術は成熟を迎えつつあるとともに、社会ニーズも明確になりつつある。今こそ“遠隔からみえないものを見る技術”としてのライダーの産業応用での飛躍と、伝統あるレーザーセンシング学会の更なる活性化に期待したい。