ISSN 2435-6239

JOURNAL OF LASER RADAR SOCIETY OF JAPAN - **ザセンババグ学会読**









105 ページの記事参照





レーザセンシング学会誌

Journal of Laser Radar Society of Japan

Volume 3, Number 2 (October 2022)



Prefatory note

産業応用ライダー特集:緒言

Introduction of Special Issue on LiDARs for Industrial Applications

◆特集「産業応用ライダー」

Special Issue on LiDARs for Industrial Applications

(総説)「産業応用ライダー」特集号によせて

(Review) Preface to Special Issue on LiDARs for Industrial Applications

(論文)工場内浮遊粒子状物質の測定を目的とする小型ミー散乱ライダーの開発

(Paper) Development of Mie scattering lidar for measuring aerosols in indoor factory environment 左成信之,板谷庸平,横川守久,神慶孝,杉本伸夫,西澤智明 Nobuyuki Sanari, Youhei Itaya, Morihisa Yokokawa, Yoshitaka Jin, Nobuo Sugimoto, and Tomoaki Nishizawa … 71

(解説) 光コム干渉による高機能光計測

(解説) 車載ライダーの動向

(Technical Review) Trends in automotive LiDARs

(解説)高性能・低コストライダーの実現に向けて ~ライダー方程式に基づく考察~

(Technical Review) Investigation toward the low-cost and high specification LiDAR based on the LiDAR equation

(解説) LIDAR を用いたスマートモニタリングと、自律モビリティへの展開

(Technical Review) Smart monitoring using LiDAR and further development for autonomous mobility

新能亮一	- Rvoichi Shinkuma ·····	1	16
新熊亮一	Ryoichi Shinkuma	····· 1	



Paper

Balance plot for visualizing and examining tradeoff between accuracy and data quantity of lidar water vapor measurement data

Atsushi Takahashi, Tetsu Sakai, Takuya Kawabata, Satoru Yoshida, and Naonori Ueda124



- ・学会誌への投稿案内
- ・学会誌投稿規定
- · 学会誌執筆要領
- ・学会誌投稿フォーム
- ・会員数の状況





産業応用ライダー特集:緒言

小林 喬郎

〒412-0024 静岡県御殿場市東山 1031-6

Introduction of Special Issue on LiDARs for Industrial Applications

Takao Kobayashi

1031-6, Higashiyama, Gotenba, Shizuoka 412-0024

(Received September 5, 2022)

This issue features on Lidars for industrial applications. Historical developments of industrial Lidars in Japan are reviewed from the viewpoint of originality, excellence, versatility, low cost etc. of the principle and method.

キーワード:ライダー, 産業応用 **Key Words**: Lidar, Industrial Application

本学会の前身であるレーザ・レーダ研究会では 1960 年代から日本におけるライダー開発を担ってきた. 学会ホームページの文書アーカイブを覘いてみれば,多くの重要な研究・開発の歴史を知ることができる. 今回,産業応用ライダー特集号を発刊するにあたり,特に,その原理・方式の独創性,優秀性,汎用性,低 価格性等から日本の産業応用ライダーの進展に歴史的に寄与したと思う内容を振り返ってみた.読者の皆様 には,この機会に改めてご参照頂き,"故きを温ねて新しきを知る"として頂きたい.

- ·東北大, 稲場文男研究室:活動紹介¹⁾
- ・東北大, 稲場文男研究室: ラマンライダー2)
- ・九州大,前田三男研究室:色素レーザー,分子,気象観測ライダー^{3),4)}
- ・国立環境研,竹内延夫グループ:大気汚染計測用大型レーザーレーダー⁵⁾
- ・千葉大. 久世宏明研究室: ライダー分光計測法の展開⁶⁾
- ・国立環境研究研、竹内延夫グループ:大型ライダーよる東アジア域大気計測⁷⁾
- ・三菱電機,平野嘉仁グループ;風向風速計測ドップラーライダーなど各種産業応用展開^{8),9)}
- ・東京ガス、井関孝行弥、田井秀夫グループ:メタンガス検出器の大量生産販売¹⁰⁾
- ・山形大,丹野研究室:眼底計測(OCT)の発明と世界的な展開¹¹⁾
- ・東京工業大,伊賀健一グループ:面発光レーザー発明¹²⁾
- ・東京工業大,小山二三夫グループ:VCSELの大量販売¹³⁾
- ・東北工業大,浅井和弘研究室とJAXA:衛星搭載樹高計測ライダー (MOLI)¹⁴⁾

さて,日本のライダーの進展を支えてきた本学会も 50 年の節目の本年,一般社団法人レーザセンシング 学会へと発展した.次の 50 年も,日本のライダーの発展に対し中心的な役割を果たしていくことを期待し ている.



引用文献

- 1) 稲場文男, "レーザ・レーダとその周辺技術の進展,"第1回レーザレーダーシンポジウム特別講演予稿 (1972).
- 2) F. Inaba and T. Kobayashi, "Laser Raman Radar for Chemical Analysis of Polluted Air," Nature. 224, 170-172 (1969).
- O. Uchino, M. Maeda, J. Konno, T. Shibata, C. Nagasawa, and M. Hirono, "Observation of strastspheric ozone by a XeCl laser radar," App. Phys. Lett. 33, 807–809 (1978).
- 4) O. Uchino, M. Maeda, and Y. Miyazoe, "Differential-absorption lidar measurement of ozone with excimer- Raman hybrid laser," Opt. Lett. 8, 347–349 (1983).
- 5) H. Shimizu, Y. Sasano, H. Nakano, N. Sugimoto, I. Matsui, and N. Takeuchi, "Large scale laser radar for measuring aerosol distribution over a wide area," Appl. Opt. 24, 617–626 (1985).
- 6) H. Saito, N. Manago, K. Kuriyama, and H. Kuze, "Near-infrared open-path measurement of CO2 concentration in the urban atmosphere," Opt. Letts. 40, 2568–2571 (2015).
- 7) A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Jin, S-W Kim, Z. Wang, D. Batdorj, and N. Sugimoto, "Evolution of a lidar network for tropospheric aerosol detection in East Asia," Opt. Eng. 56, 031219 (2016).
- S. Kameyama, T. Ando, K. Asaka, Y. Hirano, and S. Wadaka, "Compact all fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing," Appl. Opt. 46, 1953–1962 (2007).
- 9) 平野嘉仁, "巻頭言 ライダー技術と産業応用,"レーザセンシング学会誌. 2,1-3 (2021).
- 10) 井関孝弥, 田井秀男, "レーザー分光による可搬型遠隔ガス漏洩検出器,"レーザー研究. 29,142-146 (2001).
- 11) 国内特許, 丹野直弘, 市村勉, 佐伯昭雄, "光波反射像測定装置," 2010042 号 (1990).
- 12) 伊賀健一, "面発光レーザーとマイクロレンズの誕生," Microoptics news. 36 (2018).
- 13) 小山二三夫, "面発光レーザーの進展,"応用物理. 84, 1078-1085 (2015).
- 14) 浅井和弘,境澤大亮,水谷耕平,西澤智明, "解説 宇宙から植生を観測するライダーミッション MOLI (Multi-footprint Observation Lidar and Imager),"レーザセンシング学会誌. 1,45-54 (2020).





特集 産業応用ライダー

「産業応用ライダー」特集号によせて

平野 嘉仁

三菱電機株式会社(〒100-8310 東京都千代田区丸の内 2-7-3)

Preface to Special Issue on LiDARs for Industrial Applications

Yoshihito Hirano

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

(Received August 26, 2022; revised August 31, 2022; accepted September 7, 2022)

In recent years, the industrial applications of LiDARs, such as 3D modeling in "Society 5.0" and "Metaverse", are progressing. This paper describes the overview of the special issue on "LiDARs for Industrial Applications". In the special feature, the following four commentary papers are picked up; 1. Advanced optical measurements using optical frequency comb interferometry, 2. Trends in automotive LiDARs, 3. Investigation toward the low-cost and high specification LiDAR based on the LiDAR equation, 4. Smart monitoring using LIDAR and further development for autonomous mobility.

産業応用ライダー特集号によせて

近年, ライダーの産業応用, 特にその 3D 画像を取得するセンサとしての応用が脚光をあびている. ネットで LIDAR を検索すると, その略語として従来の Light Detection and Ranging (光検出と測距) の他に, Laser Imaging Detection and Ranging (レーザ画像検出と測距) と併記されるようになった. 周囲の 3 次元 (3D) 環境を精密にデジタル化するライダーは, Society 5.0 でのフィジカル空間をサイバー空間にデジタル ツインとして再現するセンサや, メタバースにおけるリアルな 3D モデルを構築するためのツールとして, 現代社会にとって不可欠なものとなりつつある.

こういった社会的背景をうけて、広範囲な空間情報を高精度、高精細、リアルタイムに取得したいという ライダー性能への要求も高まっている.ただ、2Dの画像を一括で取得できるカメラのように 3D 画像を取 得することは容易ではない、ライダーは、レーザー光源、受光器、レーザー光送受信光学系、信号処理装置 などから構成され、レーザー光を照射している方向(視線方向)の物体で反射した光の往復の飛行時間 (TOF: Time of Flight) から物体までの距離を計測する装置である.ここでは、距離計測のものさしに光の速 さを用いているので高精度化には高分解な時間計測が必要となり、一般的なパルス型のライダーの場合、ナ ノ秒=15 cm 程度が目安である.このため,最近の工業製品のデジタルツイン化などで要求されるような 100 µm 以下の精度を出すには異なる手法が必要となる.また、自分の周りの環境全体の 3D 画像を取得する には、レーザー光を垂直・水平方向に走査しながら距離情報を取得し、自分の位置を基準とした 3D データ に再構築する必要がある.この場合、画像の解像度とフレームレートの積に相当する回数の距離計測が必要 となり、例えば車の自動運転用ライダーの一例¹⁾では、表示解像規格の QVGA (Quarter Video Graphic Array 320×240 画素), フレームレート 10 回として 1 秒間に約 77 万回となる. これは, 計測対象の時間的, 空間 的な変化が小さい従来のイメージング型の気象計測用ライダーの一例で視線計測回数が高々8Hz²⁾であるこ とを考えると、光源やビーム走査、信号処理、取得データの通信などに10万倍近い速度が要求され、並列 計測³⁾などの新規技術導入が必要となる. さらに、ライダーの応用が進むにつれ、その搭載機器もスマート フォン、自動車、ロボット、ドローンなどとなり、普及に向けては、小型化、低価格化、低消費電力化に向



けた技術開発も必須となっている.

今回の特集号では、これら進展を見せている産業応用ライダーに関連する1件の研究論文と4件の解説 記事を紹介する.研究論文⁴⁾は、柴田科学(株)の左成氏によるもので、工場等の屋内作業場におけるエア ロゾルの分布計測を目的とした小型ライダーの開発についてである.屋内空間でのエアロゾル(ソフトター ゲット)の3D可視化は、大気観測を中心に発展してきた本学会との関わりが深く、また、労働環境や生活 環境の監視・改善といった新しい産業応用が期待され興味深い.ぜひご一読頂ければと思う.これ以外の4 件は、本学会の産業応用ライダー調査専門委員会が開催した(企画中を含む)オンラインセミナーの内容か ら選んだ解説記事であり、主に立体構造物(ハードターゲット)を3D画像化するライダーに関するもので ある.これらについて以下順に紹介する.

最初の解説記事⁵⁾では、(株)XTIAの今井氏に、光の広帯域性を利用した新しい方式として光コムを用いた高精度な距離計測、形状計測について紹介頂く.冒頭にも述べたが、一般に用いられるパルスレーザーでのTOF距離計測の場合、ns以下とパルス幅が短くなってくると距離精度は電気系の応答で制限されてくる. 光コムは、一定の周期で繰り返す超短光パルスを周波数領域で見た場合の櫛状のスペクトルが超広帯域に広がっている事から命名されているが、ここで紹介される方式は、この光コムを送信し干渉受信(ヘテロダイン検波)することで、低周波電気信号のスペクトル解析から距離を計測するもので、電気系の応答制限を解消し、長距離(数10m以上)、高精度(µmオーダ)、高速計測(~kHz)を可能とする画期的な方式である.ビーム走査と組み合わせることで、これまで不可能だった車のエンジンなどの複雑な形状の精密なリアルタイム計測装置として応用が進んでいる.光コムを用いた計測は、光の広帯域性を有効に活用できる方式として、更なる技術発展、産業応用が期待できる分野である.

第二番目の解説記事⁶⁾では、パラダイムリサーチ社の鷲尾氏に、その想定されるビジネス規模から 3D ラ イダーの開発を先導している車載ライダーについて、その発展の歴史から今後の展開までを、ビジネス規模 やそこに用いられる技術内容を含めて解説頂く、特にコストや環境適応性などを含む厳しい性能要求に対応 するためのライダー方式について、現状の機械的なビーム走査手段を有するものから、機械的なビーム走査 手段を持たない全固体化に向けての多くの新しい取り組みをわかりやすく分類頂いており、ともすれば最近 のライダーベンチャー企業のニュースに振り回され気味の読者の頭の整理に有益な情報となろう、詳細は本 論文に譲るが、光源として VCSEL アレイ、受光器として SPADs (Single Photon Avalanche Diodes) アレイ、 ビーム走査として Metasurface、OPA (Optical Phased Array)、FPSA (Focal Plane Switch Array) など、半導体 技術による小型化・集積化・高機能化が今後の発展のカギとなることが窺える.

第三番目の解説記事⁷⁾では、三菱電機(株)の亀山氏に、産業用ライダーで高性能(長距離・高精細・高精 度・リアルタイム)と低コストを実現するにあたり考慮すべき観点をライダー方程式に立ち返って解説頂 く、特に各種構成の 3D ライダーを、主要要素である撮像方式、変調方式、送受信方式毎に方式で分類し、 ライダー方程式と実例でそれぞれの長所・短所を解説頂いている、ライダー技術に馴染みのない読者の学習 にはもちろんであるが、専門家にとってもライダー設計における解決すべき課題の整理に有益な内容である ので、是非一読願いたい.

本特集の最後の解説記事⁸⁾では、芝浦工業大学の新熊先生に、複数の固定ライダーを用いたセンサネット ワークによる 3D 空間のスマートモニタリングの方式と、デジタルツイン化したモニタリングデータを利用 したモビリティの自律動作化について解説頂く、特に帯域が限られる通信インフラを用いてリアルタイムに センサネットワークを構築する場合の個別ライダーデータの選択による通信容量の抑制方法や、集約した データから歩行者や車両などの高速に検出する信号処理方式、スマートモニタリングデータを用いたモビリ ティ自律動作の実証結果などを紹介頂く、モバイル通信を利用してリアルタイムにフィジカル空間をデジタ ルツイン化して利用するための技術は、モビリティに限らず Society 5.0 のさまざまな場面で用いられていく と考えられ、ライダーの産業応用にはますます不可欠な技術となろう.

最後に、レーザセンシング学会の産業応用ライダー調査委員会(小林委員長)では、今年度も進展を見せている各種ライダー技術(ライダー用デバイス、ライダー方式、ライダー応用等)に関するオンラインセミナーを通して会員の皆様に学びの場を提供していく予定であり、是非活用頂きたい.



参考文献

- 1) D. Inoue, T. Ichikawa, and H. Matsubara, "LiDAR system with a coin-sized sensor head and an optical preamplifier capable of detection at 200 m," Journal of Lightwave Technology. **39**, 5715–5721 (2021).
- 2) Y. Ito, M. Imaki, T. Sakimura, T. Yanagisawa, and S. Kameyama, "Evidence of decreased heterodyne-detection efficiency caused by fast beam scanning in wind sensing coherent Doppler lidar, and demonstration on recovery of the efficiency with lag-angle compensation," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. **60**, 5704210 (2022).
- 3) S. Kameyama, A. Hirai, M. Imaki, N. Kotake, H. Tsuji, Y. Nishino, Y. Ito, M. Takabayashi, Y. Tamagawa, M. Nakaji, E. Ishimura, and Y. Hirano, "Demonstration on range imaging of 256 × 256 pixels and 30 frames per second using short wavelength infrared pulsed time-of-flight laser sensor with linear array receiver," Optical Engineering. 56, 031214 (2016).
- 4) 左成信之,板谷庸平,横川守久,神慶孝,杉本伸夫,西澤智明,"工場内浮遊粒子状物質の測定を目的とする小型ミー散乱ライダーの開発,"レーザセンシング学会誌. 3,71-78 (2022).
- 5) 今井一宏, マークジャボロンスキー, 興梠元伸, "光コム干渉による高機能光計測," レーザセンシング学会 誌. 3, 79-90 (2022).
- 6) 鷲尾邦彦, "車載ライダーの動向," レーザセンシング学会誌. 3, 91-104 (2022).
- 7) 亀山俊平, "高性能・低コストライダーの実現に向けて ~ライダー方程式に基づく考察~," レーザセンシング学会誌. 3, 105-115 (2022).
- 8) 新熊亮一, "LIDAR を用いたスマートモニタリングと、自律モビリティへの展開、" レーザセンシング学会誌.
 3, 116-123 (2022).

平野嘉仁

三菱電機株式会社 半導体・デバイス事業本部 技術顧問

略歴:1985年大阪大学基礎工学研究科物理系修士課程修了.同年,三菱電機(株)入社.同社情報技術総合研究所光・マイクロ波回路技術部長,同社高周波・光デバイス製作所長,同社半導体・デバイス事業本部技師長などを経て,2019年より現職,現在に至る.

2001年大阪大学博士(工学).レーザー学会業績賞(奨励賞,進歩賞),電気科学技術奨励賞,日本航空宇宙学会技術賞,桜井健次郎氏記念賞などを受賞.レーザセンシング学会理事,IEEEフェロー,レーザー学会フェロー,応用物理学会会員(2019年度,2020年度 副会長),OPTICA 会員.





特集 産業応用ライダー

工場内浮遊粒子状物質の測定を目的とする 小型ミー散乱ライダーの開発

左成 信之¹, 板谷 庸平¹, 横川 守入¹, 神 慶孝^{*2}, 杉本 伸夫², 西澤 智明²

¹柴田科学株式会社(〒340-0005 埼玉県草加市中根 1-1-62)
 ²国立研究開発法人国立環境研究所(〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

Development of Mie scattering lidar for measuring aerosols in indoor factory environment

Nobuyuki Sanari¹, Youhei Itaya¹, Morihisa Yokokawa¹, Yoshitaka Jin^{*2}, Nobuo Sugimoto², and Tomoaki Nishizawa²

¹Sibata Scientific Technology LTD., 1–1–62 Nakane, Soka, Saitama 340–0005 ²National Institute for Environmental Studies, 16–2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305–8506

(Received June 10, 2022; revised August 13, 2022; accepted September 15, 2022)

A prototype lidar for measuring the spatial distribution of suspended particulate matter (aerosol) in indoor factory workplaces was built and evaluated in a laboratory. The lidar is a Mie scattering lidar using a third harmonic laser-diode pumped Nd:YAG laser (355 nm). The transmitter and receiver were composed on an optical breadboard and manually scanned on a tripod. The lidar data were recorded together with the angular data from a gyro sensor, and the aerosol distribution was displayed in nearly real-time. The sensitivity was evaluated by measuring the distribution of smoke from incense sticks placed in the laboratory. Based on the results, the possibility of downsizing the lidar system was discussed. Also, a method was studied to display the aerosol distribution in a 3D space in combination with a small hard-target LiDAR commercially available.

キーワード:環境計測, ライダー, エアロゾル, 粉じん **Key Words**: Environmental measurement, Lidar, Aerosols, Dust

1. はじめに

浮遊粒子(エアロゾル)の濃度は室内環境の指標の一つであり¹⁾,生活の大部分を過ごす室内では吸入曝 露の時間が長いことから,エアロゾルの人体への健康影響を把握する上で濃度の計測が重要である²⁾.ま た,エアロゾルの空間分布を測定することで,換気や空気清浄機などによる環境改善効果を可視化するなど の応用が可能である.近年,地形や構造物(ハードターゲット)の立体構造を計測するライダー(いわゆる LiDAR)が広く用いられるようになっているが,室内環境のエアロゾル(ソフトターゲット)の計測につい ては,いくつかの報告例³⁻⁵⁾があるものの,現時点ではあまり普及していないようである.例えば,Qiuら⁵⁾ は,近距離のPM2.5を測定するため,可視光レーザーとイメージングカメラを使ったライダーシステムを 開発した.他にも,近距離エアロゾルを測定するライダーの例として,Ceolatoら⁶⁾は風洞施設内で発生さ せたエアロゾルプルームを高い時間・距離分解能で測定するバイスタティックライダーを開発している.



Shiina⁷⁾は LED を光源とした小型ライダーを開発し,近距離(~100 m)のエアロゾルや海波の計測に応用 した.これまで筆者らは,エアロゾルの分布を測定するライダーの開発を行なってきた.東アジアの大気エ アロゾル観測ネットワーク(AD-Net)の自動連続運転可能な偏光 2 波長ライダーの開発と製品化などを手 がけてきたが⁸⁾,近距離のエアロゾルの分布を手軽に計測できるようなライダー装置を開発することもター ゲットの一つとしている⁹⁾.

本論文では、比較的高濃度のエアロゾルが発生するような工場の屋内作業場などにおけるエアロゾル分布 の計測を目的とするライダーの開発について報告する.ここでは健康影響に係る工場環境を評価するため、 ある程度(数秒~数十秒)時間平均した濃度分布を計測する.対象となるエアロゾルは、溶接ヒューム、オ イルミスト、研磨材の吹付け(ショットブラストなど)で発生した粉じんなどを想定している.屋内作業場 のエアロゾルの計測では通常は粉じん計が用いられるが、分布を把握することが必要である場合や粉じん計 のコンタミネーションが問題になるような状況もあり、遠隔で計測できるライダーへの期待が大きい.ここ では、目に対する安全性が比較的高い紫外レーザー(半導体レーザー(LD)励起Nd:YAGレーザーの第三 高調波(355 nm))を光源とする実験システムを構築し、模擬エアロゾルを用いた実験により性能評価を 行った.この結果に基づいて、ライダー装置の小型化の可能性の検討を行った.また、3Dマッピング用の 市販の小型LiDARと組み合わせて、3D空間の中でエアロゾル分布を表示する手法についても検討を行った.

2. ライダー装置の試作

試作した室内エアロゾル計測ライダー実験システムのブロック図を Fig. 1 に示す.また,主な仕様を Table 1 に示す.実験システムであるため余裕のある仕様となっている.光源は LD 励起第三高調波 Nd:YAG レーザー(浜松フォトニクス L11038-13)(パルスエネルギー 300 µJ,繰り返し 100 Hz)を用いた.受信口径は 25 mm で光電子増倍管で検知した.ライダー送受信部は,光学ブレッドボード上に構成し,三脚に載せて 手動で水平,垂直スキャンを行った.ライダー受信信号(1000 点データ,計測距離 15 m分)はデジタルオ シロスコープ(Teledyne LeCroy WaveSurfer 10)(8 bit, 10 Gsps)で記録し,オシロスコープ上で 10 ショット 積算した後でオシロスコープの内臓 HDD に保存し,データ収集・データ処理用コンピュータに転送して記録した.室内エアロゾルの計測では,壁面の散乱強度がエアロゾル散乱に比べて桁違いに大きいので,壁面の散乱が受信視野から外れるように送受信ビームの方向を調整した.壁面からの散乱を受信視野から外すため,送受信の光軸間の距離を取り(ここでは約 150 mm とした),受信系を送信側に約 50 mrad だけ傾けて



Fig. 1 Block diagram of the experimental indoor lidar.



<u>Transmitter</u>	
Laser	Hamamatsu L11038-13
Wavelength (nm)	355
Pulse energy (µJ)	300
Pulse repetition (Hz)	100
Pulse width (ns)	~1.0
Transmitted beam	10
diameter (mm)	10
Transmitted beam	0.5
divergence (mrad)	~0.5
Receiver	
Diameter (mm)	25
Field-of-view (mrad)	100
Optical filter	1.0
bandwidth (nm)	1:0
Neutral density filter	
optical density at 355	2.5
nm	
Detector	Photomultiplier tube (Licel PM-HV-R9880)
Data acquisition	
Transient recorder	8 bit digital oscilloscope
	(Teledyne LeCroy WaveSurfer 10)
Sampling rate (Gsps)	10
Gyro sensor	
Sensor	Yoctopuce Yocto-3D
Sensitivity (deg)	0.1
Precision (deg)	0.1

Table 1 Specification of the experimental indoor lidar.

いる. 実際の調整では、ライダーから約3mの位置にハードターゲットを設置し、受信望遠鏡の向きを調整した. また、受信視野を広く(100 mrad)することで近距離からの信号も受信できるようにしている. 本システムではライダーから約2mの距離からのライダー信号を受信することが可能である. ライダー測定の方向(方位角・高度角)はブレッドボード上に設置したジャイロセンサで計測し、ライダーデータと同時にデータ収集・データ処理用コンピュータに取り込んだ. ライダー実験システムの写真を Fig.2 に示す.

3. 室内エアロゾルの測定実験

実験室内に置いた線香の煙を用いて測定実験を行った.実験の配置を Fig. 3 に示す.線香から約 2 m 離れ た場所に粉じん計(柴田科学 LD-5R)を設置し、この計測値をその場所におけるエアロゾル重量濃度のトゥ ルースデータとした.粉じん計からさらに約 1 m の場所に空気清浄機を設置した.空気清浄機の吸引によ り、線香の煙は空気清浄機側に緩やかに拡散した.ライダー測定は、三脚上の送受信部を手動で水平および 垂直にゆっくり掃引して行った.手動であるので掃引速度は一定ではないが、ジャイロセンサから十分な精 度で方位角・高度角データが得られるので、コンピュータ上で対応する精度で空間分布を再現できる.

ライダーデータからエアロゾル重量濃度を以下の方法で推定した.まず,ライダーデータから背景光雑音 を除去する.次に距離2乗補正を行ない,減衰後方散乱係数に比例する量を求める.測定は近距離であるの で,信号の減衰は無視できる.距離2乗補正信号は空気分子のレイリー散乱とエアロゾルのミー散乱の和で ある.前者はほぼ一定で,後者はエアロゾル重量濃度に比例すると考えられる.そこで,粉じん計の近傍の ライダーデータを測定し,まず十分にエアロゾル濃度が低く粉じん計の値が1μg/m³未満(検出限界以下) となる場合の距離2乗補正信号からレイリー散乱成分を推定する.次に,エアロゾル濃度の高いデータ(今 回の実験では最大17μg/m³)について,距離2乗補正信号からレイリー散乱成分を引いた値と粉じん計の





Fig. 2 Photographs of the experimental indoor lidar system. (Top) Transmitter receiver system, (bottom) data acquisition and analysis system.



Fig. 3 Setup (top view) for the indoor lidar test experiment.



重量濃度の対応を調べ,重量濃度への換算係数を求める.この換算係数をスキャン全域に適用して重量濃度 の分布を求める.

距離2乗信号はライダー方程式から以下の式で表される^{10,11)}.

 $X(r) = P(r)r^{2} = K[\beta_{1}(r) + \beta_{2}(r)]T(0, r)^{2}$ (1)

ここで、Pは背景光雑音を除去した後の受信信号強度、rはライダーからの距離、Kはレーザーエネル ギーなどで決定されるシステム定数である。βは後方散乱係数で下付き文字の1と2はそれぞれエアロゾル 成分と大気分子成分を表す、Tはライダーから距離rまでの大気透過率で、光が往復するため2乗としてい る.ここでは、近距離であるため大気透過率は1とすることができる、エアロゾル重量濃度を算出するため には、ライダーデータから後方散乱係数を抽出し、粉じん計と比較する必要がある、本研究では、線香の煙 が無いクリーンな場合をエアロゾルフリーと仮定し、エアロゾルフリー信号との強度比を計算することで、 後方散乱係数を抽出した.

$$\beta_1(r) = \beta_2 \left[\frac{X(r)}{X_2(r)} - 1 \right]$$
(2)

ここで、*X*₂ はエアロゾルフリー信号を表す. なお、(2) 式中の*X*(*r*)/*X*₂(*r*) は全後方散乱とレイリー散 乱後方散乱の比(後方散乱比)である.

重量濃度の分布 *M*(*r*)は(3)式のように β₁に比例すると仮定する.

 $M(r) = C_{\rm MB}\beta_1(r) \qquad (3)$

ここに、 $C_{\rm MB}$ は換算係数で、粉じん計とライダーの比較により求めた. エアロゾルの重量濃度が 15 µg/m³ のとき受信信号強度はエアロゾルフリー時の約 2 倍、すなわち後方散乱比は約 2 であった. 355 nm のレイリー散乱の後方散乱係数は約 7.5×10⁻⁵ m⁻¹sr⁻¹ であるので、重量濃度 15 µg/m³ に対応するミー散乱後方散乱係数は約 7.5×10⁻⁵ m⁻¹sr⁻¹ である. すなわち、後方散乱係数—エアロゾル重量濃度換算係数 $C_{\rm MB}$ は 2.0×10⁵ (µg/m³)/(m⁻¹sr⁻¹) となる.

4. 結果と考察

掃引測定により得られたエアロゾルの分布を Fig. 4 に示す. Fig. 4 (a) が水平スキャン, Fig. 4 (b) は Fig. 4 (a) の点線に沿った垂直スキャンである. 重量濃度をカラースケールで表示している. Fig. 4 (a) に 線香の位置, 粉じん計の位置を示した. Fig. 4 (b) の点線は水平スキャンの面の位置を表す. 線香の煙は線



Fig. 4 Spatial distributions of aerosol mass concentration obtained from the horizontal and vertical scan measurements. (a) Plan Position Indicator (PPI) scan and (b) Range Height Indicator (RHI) scan.



香の位置から右奥方向に広がっている. 濃い部分で濃度は約 40 μg/m³ であった. 粉じん計の位置での重量 濃度は 15 μg/m³ であった. 遠距離の非常に強い信号は壁面の散乱によるものである. 受信視野から外して いるにもかかわらず, 壁面の散乱は大きく測定されている. なお, この実験ではエアロゾルの散乱が適当な 信号レベルとなるように受信系に ND フィルタ(減光フィルタ)を用いて調節した. 壁面の信号は AD 変換 のレンジを超えて飽和しているがエアロゾルと比べて 2 桁以上大きい.

エアロゾルの分布を室内空間の中で明確に把握するために,ハードターゲットの 3D マッピングを行う LiDAR と併用して,同一のデータ空間のなかでエアロゾル濃度分布を表現することが有用である.ここで は、インテル社の LiDAR (L515)を用いて実験室の 3D データを計測し、その 3D 空間の中にエアロゾル分 布を表示する方法を検討した.Fig.5 に Fig.4 に示したスキャン面を表示した一例をしめす.3D データの中 の色々な場所から色々な角度、あるいは断面で分布を見ることができるので、構造物との位置関係などを明 瞭に把握するために有用である.なお、L515 は今回発生させたエアロゾルには感度が無く、3D データには 表示されていない.



Fig. 5 Example of 3D indication combining the aerosol lidar data (color scale) and the 3D mapping data from a commercial LiDAR (black points). The aerosol lidar data are the same as in Fig. 4. Brown areas indicate strong scattering from the wall and the floor measured by the aerosol lidar.

室内エアロゾルライダーでは壁面の散乱が非常に大きいことを述べたが、以下に、エアロゾルと壁面の信 号の大きさを定量的に比較する.いま、重量濃度が10 μg/m³の場合を考えるとすると後方散乱係数は約5 ×10⁻⁵m⁻¹sr⁻¹となる.一方、Lambertianのハードターゲット¹²⁾では、後方散乱係数は、*R/π*Δ(*R* は反射 率、Δ はレーザーの折り返しパルス長)であるので、反射率を0.3 程度、レーザーの折り返しパルス長(距 離分解能)を0.3 m とすると後方散乱係数は0.3 m⁻¹sr⁻¹となる.したがって、信号強度は4桁程度違うこ とが分かる.以上のことから室内エアロゾルライダーでは、例えば、送信ビームの裾の微弱な迷光がハード ターゲットに当たってゴースト信号になるような現象に注意が必要である.したがって、送信ビーム形状や 受信視野に注意が必要である.また、一般に、フラッシュライダー方式(送信ビームを広げて、広い視野の ライダーイメージを同時に受信する方式)では室内のエアロゾル測定は難しいことが推測される.測定対象 であるエアロゾルよりも近距離にもハードターゲットがあるような場合には、ハードターゲットの散乱を含 む多重散乱が別の方向のエアロゾル計測に干渉する可能性がある.

本研究において試作したライダーにより、室内で発生させた模擬エアロゾルが十分な感度で測定できることが確認された.実際のターゲットとして想定している工場環境では濃度が数倍以上高いと想定される¹³⁾ので、現システムが十分に活用できると考えられる.想定している工場環境ではエアロゾル濃度が数十µg/m³~数 mg/m³であるため、今回の実験のケースは測定下限値の濃度といえる.その一方で、現在の実験システムは透過率 0.3% の ND フィルターにより受信光を減光する余裕を持った仕様であり、また光学部品等



が最適化されていないので、さらに小型化が可能である. 現システムのレーザーパワーは平均パワー 30 mW であるが、実験では 0.3% の ND フィルタを用いており、これを外せば(背景光雑音が小さいショッ トノイズリミットであれば)平均パワー 0.1 mW のレーザーで同じ性能が得られることになる. したがっ て、さらに小型の LD 励起第三高調波 Nd: YAG レーザーが使用できるので、ライダー送受信部はハンドヘル ド型とすることも十分可能である.

装置の小型化の他に、測定機能の拡張も考えられる.まず考えられるのは、偏光解消度測定機能の追加に よる非球形粒子の検知である.これによって、鉱物粒子や研磨くずなどを感度良く検知できる可能性があ る.また、散乱を多数の散乱角で同時に受信するマルチスタティックライダー方式を用いてエアロゾル粒子 の粒径分布測定の可能性もある¹⁴⁾、測定が近距離なので、一つの送受信部に複数の受信系を組み込むこと ができると考えられる.さらに、蛍光を測定することによって、蛍光性のエアロゾル粒子(ある種の鉱物粒 子、プラスチック、繊維など)の分布を測定する可能性も考えられる^{15,16)}.これらについては、今後、測定 のニーズを考慮して検討を進める考えである.

5. おわりに

ミー散乱ライダーによる室内エアロゾル測定について実験的な検討を行い,今後,実際の作業現場におけ る応用につながるボジティブな結果を得ることができた.ライダー自体としては非常にシンプルなものであ るが,エアロゾルの散乱が部屋の壁面の散乱に比べて数桁小さいことによる問題など,室内ライダー特有の 留意点を明確にすることができた.また,ハードターゲットの3Dマッピング用の小型のLiDARを併用し て同じ3D空間内にエアロゾル分布を表示する手法は,構造物とエアロゾル分布の関係の把握などに有用 で,今後,このような利用手法が広く用いられると期待される.さらに,粒子の非球形性や粒径の測定,蛍 光測定など,ライダー手法としての拡張の可能性も考えられる.今後,実際の作業環境などにおいて実証試 験を行い,さらに研究開発を進める計画である.

引用文献

- 1) 関根嘉香, 蘓原滉稀, 三澤和洋, "大気中の微粒子およびその室内への侵入,"室内環境. 23 (2), 121-127 (2020).
- A. J. Koivisto, K. I. Kling, O. Hänninen, M. Jayjock, J. Löndahl, A. Wierzbicka, A. S. Fonseca, K. Uhrbrand, B. E. Boor, A. S. Jiménez, K. Hämeri, M. D. Maso, S. F. Arnold, K. A. Jensen, M. Viana, L. Morawska, and T. Hussein, "Source specific exposure and risk assessment for indoor aerosols," Sci. Total Environ. 668, 13–24 (2019).
- 3) 北藤典也, 矢吹正教, "高距離分解能マルチスペクトル検出器を用いたミー・ラマンライダーの開発," 第 36 回 レーザセンシングシンポジウム, 11 (2018).
- 4) 齊藤保典,小林一樹,"ライダー法による衣服類脱着等の日常動作における付着ダスト放出状況の実時間空間分 布観察,"日本家政学会誌. 72 (11),730-738 (2021).
- 5) Y. Qiu, S. Tao, X. Yun, W. Du, G. Shen, C. Lu, X. Yu, H. Cheng, J. Ma, B. Xue, J. Tao, J. Dai, and Q. Ge, "Indoor PM2.5 profiling with a novel side-scatter indoor lidar," Environ. Sci. Technol. Lett. 6 (10), 612–616 (2019).
- 6) R. Ceolato, A. E. Bedoya-Velásquez, and V. Mouysset, "Short-range elastic backscatter micro-lidar for quantitative aerosol profiling with high range and temporal resolution," Remote Sens. **12**, 3286 (2020).
- 7) T. Shiina, "LED mini lidar for atmospheric application," Sensors. 19 (3), 569 (2019).
- 8) 杉本伸夫, "エアロゾル計測用ライダーシステム,"レーザセンシング学会誌. 1 (1), 4-13 (2020).
- 9) N. Sugimoto, T. Nishizawa, Y. Jin, N. Sanari, Y. Itaya, and M. Yokokawa, "Development of compact backscattering lidars for aerosol monitoring applications including indoor use," Proceedings of Optics and Photonics for Sensing the Environment, ETu3E. 3 (2020).
- 10) R. M. Measures, "Laser Remote Sensing Fundamentals and Applications," John Wiley & Sons, Inc., Hoboken (1984).
- 11) C. Witkamp (ed.), "Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere," Springer Series in Optical Sciences, Springer (2005).
- 12) K. N. Liou, "An Introduction to Atmospheric Radiation (2nd Ed.)," Academic Press Inc., Elsevier (2002).
- 13) 大谷吉生, "大型建機製造工程で発生する溶接フュームの測定,"エアロゾル研究. 33 (4), 233-237 (2018).
- 14) Y. Jin, N. Sugimoto, T. Nishizawa, T. Yoshitomi, A. Sawada, W. Sarae, A. Hattori, Y. Yamasaki, H. Okamoto, and K. Sato, "Measurement of water mist particle size generated by rocket launch using a two-wavelength multi-static lidar," Appl. Opt. 58 (23), 6274–6279 (2019).



- 15) N. Sugimoto, Z. Huang, T. Nishizawa, I. Matsui, and B. Tatarov, "Fluorescence from atmospheric aerosols observed with a multi-channel lidar spectrometer," Opt. Express. 20 (19), 20800–20807 (2012).
- 16) 齊藤保典,"蛍光分光法と地球環境センシング技術としての蛍光ライダーへの適応事例,"レーザセンシング学会
 ii. 2 (2), 53-66 (2021).

左成信之

1995 年柴田科学器械工業株式会社(現柴田科学株式会社)に入社.現在まで大気・室内環境測定機器及び労働衛生 測定機器の開発に従事.環境省の黄砂対策事業として 2004 年に富山県環境科学センターに設置したライダー装置以 来,ライダー関連装置の開発に携わる.レーザセンシング学会会員,応用物理学会会員.





特集 産業応用ライダー

光コム干渉による高機能光計測

今井 一宏*1, マーク ジャボロンスキー¹, 興梠 元伸¹ ¹株式会社 XTIA (〒140-0002 東京都品川区東品川 3-32-42 IS ビル 2F)

Advanced optical measurements using optical frequency comb interferometry

Kazuhiro Imai^{*1}, Mark Jablonski¹, and Motonobu Kourogi¹

¹XTIA Ltd., IS Building 2F, 3–32–42 Higashishinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 140–0002

(Received June 7, 2022; revised July 13, 2022; accepted July 29, 2022)

Optical frequency comb technology bridges the gap between the optical domain and the microwave domain. The optical frequency comb enables rapid and precise ranging based on time-of-flight measurements in the optical band with interferometric analysis in the microwave band. In this paper, we introduce high-precision absolute distance and profile measurement systems using electro-optic modulator-based optical frequency combs. The accuracy and the reproducibility of the measurements are better than 1 μ m. The repetition rate of the measurements is 500 kHz within the ambiguity-free measurement range and 1 kHz for longer distances.

キーワード:光コム,干渉計,絶対距離計,形状計測,デュアルコム距離計測 Key Words: Optical comb, Interferometer, Absolute distance meter, Profile Measurement, Dual comb ranging

1. はじめに

光波の飛行時間法(Time of Flight: TOF)による距離計測は長さの定義に即した直接的な計測法であるが, 電子回路の帯域制限があるためフェムト秒の時間分解能,またはマイクロメートルの距離分解能を達成する ことは困難である.精度が要求される場合,一般的には周波数安定化レーザーの波長を基準とするレーザー 干渉計が用いられる.真空中のレーザー波長は光の速さを周波数で割った値であるので,周波数が安定なら ば波長が高精度な物差しの役割をする.測定対象物までの距離が変化する際の反射光の位相変化を干渉とし て電気信号に変換するため,高速な信号処理を要せず高精度に距離を求められる.しかし,原点から変化の 積算量として距離を求めるため,光線遮断時に原点復帰が必要であるなど実用上の課題がある.

光エレクトロニクスの研究開発が進展しているなかでも未だに高精度な TOF 距離計測が容易ではないこ との要因はレーザー技術と電子回路技術の乖離にある.レーザー技術が光の周波数の高さを反映し、より広 い帯域で高速な信号を扱えるように進化しているのに対して、光よりもはるかに周波数の低い電気信号には そもそも光信号を十分に支えるだけの帯域がない.したがって高度な光技術を実用に供するためには両周波 数帯域を仲立ちする仕組み、融合する技術が必要である.

光コムは一定の周波数間隔で並び、位相同期された櫛状の周波数成分からなる光である¹⁾. 隣接する成分 との周波数差は高くてもギガヘルツ程度になっており、光コム帯域内の様々な計測が干渉を介して電気的に 実行できる. 光コムはエレクトロニクスと光技術の橋渡しとして先駆的な役割を担ってきた. 黎明期の光コ ムはマイクロ波帯の原子時計を基準にレーザー周波数を測定するために使用された¹⁻³⁾. 光コムによるレー ザー周波数計測は 2005 年ノーベル物理学賞にもつながった技術であるが、光コム関連技術の発展により現 在では時間・周波数の研究分野で一般的に利用されている手段である.



光コムは線スペクトル由来の長い可干渉距離とスペクトル全体の広がりに由来する短い可干渉距離が同居 しているため, TOF 距離計測にも適性がある.光コムを干渉計の物体光と参照光として利用すると光コム が潜在的に持つ時間分解能を損なわず電子回路周波数帯域での処理が可能となって,高速,高精度の TOF 距離計測が可能となる.ここでは様々な光コム発生方式の中でも計測器への組み込みに適した電気光学変調 方式の光コムと光コム干渉を用いる距離計測,形状計測について述べる.

2. 光コム発生器

Figure 1(a)は代表的な電気光学変調型光コム発生器であるファブリペロー電気光学変調器(FP-EOM)の 構成を示す.ファブリペロー共振器内に位相変調器が挿入されている.入力レーザー周波数と共振周波数が 一致した状態で光共振器の自由スペクトル域(Free Spectral Range: FSR)の整数倍に一致する変調周波数fm の電気信号を位相変調器に与えると,変調された光が共振器を往復する周期と電気信号の周期が一致する. 被変調光は共振器を多重往復する間,毎回同じ位相で電気光学変調を受けるため深い変調が得られる. Fig. 1(b)は入出力スペクトルの変化を示しており,単一周波数vの入射光が中心周波数v,間隔fmのサイド バンド数百本に変換されて出力される.共振条件を大きく外さなければ光コムの中心周波数と周波数間隔を 切り替えることができる.一般的な位相変調器ではベッセル関数の特性に応じた強度変化の大きいスペクト



Fig. 1 (a) Operation principle of Fabry-Perot Electro-Optic modulator (FP-EOM).
(b) Drawings of input (left) and output (right) spectrums, (c) FP-EOM module, (d) Top view of new chip design. The optical cavity is between the high reflection (HR) coated (highlighted in green) chip facet ends, (e) Cross section of the new chip design.



ルとなるが FP-EOM では共振器の効果により滑らかなスペクトル形状となる.時間的には繰り返し周波数 fmの光パルス列である.ただし、位相変調が変調の周期内で瞬時周波数の高い領域と低い領域を生むこと に対応して入力周波数に対して高周波数側、低周波数側に別れた2種類の光パルスが変調の一周期に交互に 出力される.

この変調器は1970年代に大阪大学の小林らによって光パルス発生器として提案されたものである⁴⁾. それを1990年代にかけて東京工業大学の興梠らが改良して光コム発生器として光周波数の計測に利用した¹⁾. 我々はFig.1(c)のように光通信で用いられるLiNbO₃光導波路型変調器の技術を応用して装置組み込み可能 な光ファイバピグテイル付小型モジュール構造のデバイスを製品化した⁵⁾. 光共振器はFig.1(d)のように光 導波路が形成された基板の両端面に直接高反射ミラーが取り付けられた一体型構造になっており,振動に影 響されにくい. またFig.1(e)に示した変調器断面のような溝を光導波路に沿って作製して光導波路に電界 を集中する効果を高め,溝がない場合と比べて1/2~1/3のRFパワーで駆動する省電力型コム発生器も開 発している. 光共振器のFSR は温度調節によって2.5 GHz に設定される. 動作波長は1.55 µm 帯で,周波数 間隔 25 GHz, スペクトル幅 10 THz 以上の光コムを発生する.

様々な光コム発生方式の中でスペクトル幅に着目すると、1オクターブのスパンを持つモード同期レー ザー方式の性能が電気光学変調方式を上回っている。自己参照方式の光周波数測定など時間・周波数応用に はモード同期レーザー方式が利用されることが多い。しかし光コムを空間距離の正確さに展開することを考 えた場合,数 THz の発生スパンでもエレクトロニクスとの親和性の良い高度な活用ができるならば技術的 には飛躍的な前進となる。また計測機器、システムへの組み込みや製造現場での利用など電気光学変調方式 の持つ制御性の良さ、高い堅牢度、小型軽量といった特徴が優位に働く.

3. 光コム干渉計

3.1 構 成

光コムが経験した位相遅れを電気信号に変換し、スペクトル帯域幅の有効活用をもたらす技術が光コム干 渉計である^{6,7)}. Figure 2 にその構成を示す.1 台のレーザー光源(周波数 v)の出力が分割され2 台の電気 光学変調型光コム発生器(OFCG1, OFCG2)に入力されている.OFCG1, OFCG2 はそれぞれ測定対象に照 射される物体光と参照面に照射される参照光を出力する.単一周波数発振のレーザー光源を使用しており、 スペクトル線幅 15 kHz 以下,発振波長 1554.94 nm,出力約 20 mW である.ビート周波数帯域の重なりを避 けることが可能なヘテロダイン検出の構成とするため、OFCG2 側の経路に音響光学周波数シフタを挿入し



Fig. 2 Optical comb interferometer. LASER: Narrow linewidth laser diode; v, Freq. shifter: Acousto-optic frequency shifter; f_a, OFCG1: Optical frequency comb generator (objective light; f_m), OFCG2: Optical frequency comb generator (reference light; f_m + Δ f), PD1: Photo detector (reference interferometer: REF), PD2: Photo detector (target interferometer: TAR). Signal processor includes A/D converters (ADC) and a field-programmable gate array device (FPGA). T₁₂: Group Delay difference between OFCG1 and OFCG2. T: Group delay due to the round trip between the interferometer and a measuring object.



て OFCG2 への入力光の周波数を f_a (=40 MHz)だけずらしている. OFCG1, OFCG2 を駆動する変調周波数 はそれぞれ $f_m \ge f_m + \Delta f$ で表されているが, f_m が 25 GHz 帯であるのに対して Δf は 500 kHz であり, f_m と比 べて周波数差 Δf が桁違いに小さい. OFCG1, OFCG2 はそれぞれ出力の一部を検出する光検出器と制御回路 が内蔵されており, 共振周波数がレーザー周波数に追従するような制御が行われている. また光増幅器, 可 変減衰器が内蔵されていて, 光コム出力は物体光である COMB1 出力が 10 mW 以下, 参照光である COMB2 出力が 3 mW 以下に調整されている.

光コム干渉計には参照用干渉計と測定用干渉計が光路を共有する形で含まれている. PD1, PD2 はそれぞ れの干渉計の光検出器である.物体光の一部は PD1 に入力され,残りは測定対象物に照射される. 反射光 は干渉計に戻されて PD2 に入る.光コムの時間波形は変調周波数の逆数に一致する周期の光パルス列であ る.測定区間を往復せず PD1 で検出される光パルスと比較して PD2 で検出される光パルスには群遅延また は周期パルスの位相遅れが含まれる.直接検波では検出器や信号処理の帯域制限を受けるため短い光パルス 幅から期待されるほどの時間分解能は得られない.光コム干渉計では PD1, PD2 の前で物体光を参照光と 重ね合わせて,それぞれ参照光に対する物体光の群遅延を含む干渉信号として検出することで帯域の問題を 回避している.物体光と参照光は周波数間隔がわずかに異なっており,周波数帯域を圧縮しながら多波長の 位相を一括検出できる.光コムを発生してから干渉計に入るまでの遅延時間差(*T*₁₂)は、PD1, PD2 に共 通である.PD2 の干渉信号には、その遅延時間差に加えて物体光が測定対象物を往復する時間と参照光が 参照面を往復する時間の差(*T*)が含まれる.二つの干渉信号は信号処理ユニットのアナログ/デジタル (AD)変換器でデジタル信号に変換され、Field Programmable Gate Array (FPGA)で実時間のデジタル処理 を経て干渉信号間の位相差が求められる.

光コム干渉計は光コヒーレンストモグラフィー(Optical coherence tomography: OCT)用に開発された干渉 計⁸⁾を基本に距離計測用の改良を加えたものである.原理的には様々な光コム発生方法に対して同様な測距 が可能であり報告例もある^{9,10,11)}.モード同期レーザー方式など2台の独立した光コム光源で同様な計測性 能を実現するには、レーザー発振モードと繰り返し周波数の両方を広帯域かつ高精度に位相同期する必要が ある.特に繰り返し周波数については2台の繰り返し周波数にわずかな差を与えることと広帯域位相同期の 両立が求められるため難易度が高い.FP-EOMは一台のレーザー光源から周波数間隔のわずかに異なる複数 の光コムを生成するため,高精度な位相同期を行わなくても干渉の過程でレーザー光源や変調信号に含まれ る位相雑音を相殺する効果がある.短期的な計測精度向上に適した一組の光コムを生成できる.

3.2 干涉信号周波数

Figure 3 は光コム干渉の周波数関係を表す. N は光コムの中心周波数から数えたモード番号である. キャリア周波数と $N = \pm 2$ 次までの周波数成分だけ図示されている. 物体光と参照光の N 次モード周波数はそれ ぞれ $\nu + Nf_m$, $\nu + f_a + N(f_m + \Delta f)$ である. N 次モード間干渉信号の周波数は $\nu v f_m$ に関係なく $f_a + N\Delta f$ であり, 次数ごとに周波数分離された状態で検出される. 25 GHz の間隔で数 THz の周波数帯域に並んでいた光



Fig. 3 Schematic drawings of the beat signal frequencies in the optical comb interferometer. Carrier frequencies (N=0) and sidebands up to second order (N=±2) are shown. fm: frequency separation of COMB1 for object light, fm+ Δ f: frequency separation of COMB2 for reference light. fa: shift frequency at the acousto-optic frequency shifter.



コムが 40 MHz を中心とする 500 kHz 間隔のコム状干渉信号に変換され、100 MHz 程度の電気信号帯域に圧縮される。その他の組み合わせは周波数が 25 GHz 以上になり光検出器の帯域外となる。干渉信号には光パルスが経験した位相遅れが光周波数の検出感度で保存される。N 次干渉信号の位相遅れは PD1 側: $2\pi(v+Nf_m)T_{12}$, PD2 側: $2\pi(v+Nf_m)(T_{12}+T)$ となり、光周波数に比例した形式である。信号処理演算で PD1 と PD2 の位相差と次数依存性を求めることよって光パルスの位相遅れ $2\pi f_m T$ が抽出される。検出系の帯域に合わせ、入力波長を中心にスペクトル幅 1~2 THz を残す急峻な特性の光フィルタで干渉信号のエイリアスの 要因となりうる高次モードを除去している。物体光の周波数間隔 f_m が 25 GHz の場合、±20 次までの光コム 干渉は光スペクトル帯域幅 1 THz の検出と等価になる。

3.3 干涉信号波形

Figure 4 は干渉信号発生過程の模式図である. Fig. 4(a) は参照光パルス波形の包絡線,(b) は物体光パルス 波形の包絡線を表している.参照光と物体光の間で繰り返し周波数がわずかに異なっているためパルスの周 期にわずかなずれがある. Δf が 500 kHz の場合, 2 µs(=T_B)に1回の割合で物体光と参照光の光パルスの重 なりが起こる. Fig. 4(c) は重なりの強い部分を色の濃淡で示している.物体光と参照光には周波数シフタに よる 40 MHz の周波数差が与えられている.光パルスが重なり合う時間帯のみ光電流に 40 MHz のうなり波 形が生成され,重ならない時間帯では検出される光パワーの平均に比例した直流電流が出力される.交流成 分だけを見ると Fig. 4(d) の包絡線パルス状信号が 2 µs に 1回生成される.測定用干渉計で物体光に遅延が 加わると干渉信号の発生時刻はノギスのバーニア効果のように大きく拡大されて観測される.光パルスの遅 延を *T*,干渉信号の発生時刻の変化を Δt とすると, $|\Delta t| = (f_m/\Delta f) T$ となる. $f_m = 25$ GHz, $\Delta f = 500$ kHz の場 合,変調周波数の一周期 40 ps の変化が干渉信号の一周期 2 µs の変化として 50,000 倍に拡大されて観測さ れる. Δt の符号は Δf および f_a の符号に依存する.



Fig. 4 Schematic drawings of the beat signal generation in the optical comb interferometer. (a) Reference light pulses (COMB2) at a repetition rate of $f_m + \Delta f$ and period of $T_2 = 1/(f_m + \Delta f)$. (b) Object light pulses (COMB1) at a repetition rate of f_m and period of $T_1 = 1/f_m$. (c) The blue color gradient rectangle shows the durations of overlap between the reference light pulse and the object light pulse. (d) The beat signal waveform emitted from the photo detector after low-pass filtering.

Figure 5 は時間波形の一例である. (a) は PD1 から出力される参照信号波形. (b) は PD2 から出力される 測定信号波形である. 参照信号の周期 T_B 対する測定信号の遅れ Δt から変調周波数の半波長以内の距離が 求められる. 信号処理では周期信号である参照信号と測定信号をフーリエ変換して周波数解析により位相差







 $2\pi\Delta f\Delta t \, \epsilon$ 求め、それを $2\pi f_m T$ と読み替えて物体光の遅延時間 $T \, \epsilon$ 求める. 変調信号 25 GHz の半波長は約6 mm であり、その距離は多義性距離(ambiguity-free measurement range、以下 L_a)などと呼ばれる. 1 回の 計測ではその範囲内の距離が得られるのみである. 光コム距離計に応用する場合は変調周波数を切り替えな がらそれぞれの位相を計測し、それらの相対値から L_aの整数倍の距離を算出して絶対距離を求める.

3.4 駆動信号発生部

Figure 6 は FP-EOM 駆動信号発生回路の構成である.振幅調整のための増幅器,減衰器については記載を 除いてある.主となる発振器 1 台と副発振器 4 台が含まれており,主発振器と副発振器のミキシングにより 駆動信号を生成する.主発振器の周波数 F0 は 24 GHz,副発振器の周波数 F1~F4 は 1 GHz 帯で 1 GHz, 1.010 GHz, 1.0005 GHz, 1.0105 GHz である.すべての発振器は同一の参照発振器 (OCXO, 10 MHz) に位 相同期されている.主発振器の出力は 2 つに分割され、アイソレータを介してミキサの LO ポートに入る. 副発振器はそれぞれアイソレータを介して 4 入力 2 出力の RF スイッチに接続される.RF スイッチは 500 kHz 離れた 2 つの周波数を選択して、それぞれミキサの IF ポートに入力する.24 GHz と 1 GHz 帯の混 合により周波数変換された RF 出力のうち 25 GHz 帯のみバンドパスフィルタ (BPF) で切り出して光コム 発生器に供給する.

光コム干渉計は変調信号の周期を基準に位相の遅れを求めているため,駆動信号源の位相雑音が計測精度の限界を与える.周波数混合により駆動信号を生成すると共通する発振器の位相雑音が光コム干渉の位相差 計算過程で相殺され,短期的な計測精度の向上が見込める.測定光の遅延時間*T*は位相揺らぎも含む形で

$$2\pi f_m T + \phi(\Delta t, T) = 2\pi \Delta f \Delta t + \{\phi_1(t_1) - \phi_1(t_1 + \Delta t + T)\} - \{\phi_2(t_1) - \phi_2(t_1 + \Delta t)\}$$
(1)

と表すことができる. ある参照信号の発生時刻を t_1 とし, Δt は t_1 を基準にした測定信号の遅延時間である. 右辺カッコ内の位相雑音を表す部分を $\phi(\Delta t, T)$ と表した. $\phi_1(t), \phi_2(t)$ はそれぞれ COMB1, COMB2 を 駆動する信号源の位相雑音を表す. $\phi_1(t), \phi_2(t)$ を混合前の 24 GHz 発振器と 2 台の 1 GHz 発振器の位相雑音 $\phi_A(t), \phi_{B1}(t), \phi_{B2}(t)$ で表すと $\phi_A(t)$ の一部は相殺されて,

$$\phi(\Delta t, T) = \{\phi_{B1}(t_1) - \phi_{B1}(t_1 + \Delta t + T)\} - \{\phi_{B2}(t_1) - \phi_{B2}(t_1 + \Delta t)\} + \{\phi_A(t_1 + \Delta t) - \phi_A(t_1 + \Delta t + T)\}$$
(2)





Fig. 6 Schematic of the modulation signal generation unit. Amplifiers and attenuators for amplitude adjustments are not shown. BPF: 25 GHz Bandpass filters, F0: Frequency of the main oscillator, F1-F4: Frequencies of the sub oscillators.

となる. $\phi_A(t)$, $\phi_{B1}(t)$, $\phi_{B2}(t)$ は互いに独立した発振器の位相雑音であって基準発振器への位相同期帯域外において無相関である. それぞれ時間差をつけた引き算の形である. 時間差が大きいほど引き算の相殺効果が失われ計測ばらつきが増える. $\phi_{B1}(t)$, $\phi_{B2}(t)$ の時間差はそれぞれ $\Delta t + T$ 及び Δt であり, $\phi_A(t)$ の時間差は T である. T は光が測定対象区間を往復する時間であって, 往復 10 m としても約 33 ns 程度であるのに比べ, Δt は干渉信号の時間軸での遅れ時間であり最大 1 µs になる. 使用した発振器の位相雑音を Table 1 に示す. オフセット周波数 100 kHz の位相雑音は 1 GHz 帯発振器で – 143 dBc/Hz, 24 GHz 帯の発振器で – 110 dBc/Hz となっている. 比較的位相雑音の大きい 24 GHz 発振器をミキシングの共通信号としておくことでその位相雑音が Δt に依存する計測ばらつきを生まないようになっている.

SSB phase noise [dBc/Hz]								
Offset frequency	10kHz	100kHz	1MHz					
F0 (24GHz)	-107	-110	-125					
F1~F4 (~1GHz)	-123	-143	-160					

 Table 1
 Typical SSB phase noise of oscillators used in the optical comb interferometer.

4. 計測精度

Figure 7 は物体光の駆動周波数 25 GHz における光コム干渉計の計測精度を表す⁷⁾. 測定周期 2 μ s で連続 10 秒間取得した距離データから計算したアラン分散の平方根である. データの出力周期は 2 μ s に固定され ているため,連続する 2 μ s 間隔の複数データを平均して長い周期のデータとみなした. 無駄時間なく連続 データ収集されているため平均時間と計測周期は一致している. (a) は距離 24 mm と 27 mm における平均 時間と精度の関係をプロットした図である. 24 mm は $\Delta t = 0$ の状態, 27 mm は $|\Delta t| = 1 \mu$ s の状態に対応す







る. 計測の精度は,測定周期2µsにおいて0.3µm程度,測定周期1msの時におよそ20nmであった. 短期的には距離27mmの条件のほうが計測のばらつきが大きい. 100ms~1sあたりの差異はアラン分散の評価に使えるデータが少ないことや測定場所の振動や空気屈折率変動の影響である.

Figure 7(b)は測定距離と精度の関係を示している. 横軸は距離, 縦軸はアラン分散の平方根である. 計測 周期は四角の点が2 μ s, 三角の点が1 ms である. 近距離での精度は計測周期2 μ s で 0.2 μ m と 0.3 μ m の間, 計測周期1 ms では 20 nm 程度であった. 距離 5.2 m でも計測周期2 μ s で 0.4 μ m 以下である. 近距離におい ては半波長 L_a (=6 mm)の周期で $|\Delta t|$ の増減に合わせてアラン分散値の極大, 極小の繰り返しが現れる特 性となっている. また, 長距離ほどアラン分散の極小値が大きくなる傾向もみられる. それぞれ干渉信号の 遅れ Δt に依存する副発振器の位相雑音,物体光の飛行時間 T に依存する主発振器の位相雑音の影響が表れ ていると考えている.

5. 距離計

電気光学変調方式の光コムは変調周波数の切り替えによって周波数間隔を素早く変更できる.光コム距離 計ではその特徴が生かされている.光コム距離計は変調周波数を切り替えながら複数の距離を計測し,それ らの相対値から L_aの整数倍の距離を算出して絶対距離を求めている.主発振器の周波数 F0 と副発振器の周 波数 F1~F4 の加算で発生できる 4 つの周波数,25 GHz,25.010 GHz,25.0005 GHz,25.0105 GHz で順次 COMB1 を駆動する.COMB2 側は常に COMB1 側と 500 kHz 違いの周波数で駆動される.駆動周波数の差 10 MHz で約 15 m まで,さらに差 500 kHz で約 300 m までの距離測定ができる.信号の切り替えが速いた め,大気の揺らぎ,空間振動の影響を受けにくく,絶対距離を求めるために要する時間は切り替えと信号処 理を含めて約 1 ms である.連続的に繰り返し約 1 kHz のリアルタイム計測が可能である.





Fig. 8 Measurement error of Optical comb absolute distance meter (ADM). Averaging time for distance measurements is 100 ms. Distance error shows the difference between an optical comb ADM and a standard laser interferometer at National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST).

Figure 8 は光コム距離計を産業技術総合研究所の光学トンネルに持ち込んで干渉測長器との比較評価を 行った結果である.干渉計出力のビームを直接,反射体であるリトロリフレクタに照射した.干渉計出力の ビーム径は強度 1/e² の全幅で約 3.6 mm である.距離が遠いほどビーム径の拡大により反射光強度が低下し た.90 m を超えて反射強度不足により測定困難となったところで評価を打ち切った.Fig.8 の誤差はレー ザー測長器の測定値から光コム距離計の測定値を差し引いた値である.光コム距離計はレーザー測長器と比 べて長めに計測されている.距離に比例して誤差の絶対値が大きくなる傾向がみられ,比例係数の大きさは 1 m あたり 0.086 µm 程度であった.10 m 程度までは誤差がおよそ 1 µm 以内に収まっており,90 m 以上の 距離でも誤差は最大 7 µm 程度であることが確認された.評価した距離計の光源に搭載された OCXO の発振 周波数の誤差は 1×10⁻⁸ であった.また距離補正に使用した屈折率の近似式は~10⁻⁸ 程度の不確かさとさ れる¹²⁾.それらも誤差の要因と考えられる.

6. 形状計測器

6.1 構 成

光コム干渉計とスキャナによる照射位置の走査を組み合わせたものが光コム形状計測器である. Figure 9 (a) はその外観写真を示す. 高速でレーザービームをスキャンしながら L_aの範囲の高さ分布を求めて三次 元形状を得ている. f_m が 25 GHz の場合, L_aに相当する高さ約 6 mm を超える対象物を計測すると計測結果 は高さ L_aの範囲に折り畳まれてしまう. 大型部品の計測に対応するため, 計測精度が犠牲になるが f_m が 1 GHz で L_aが約 150 mm となる光源も開発した. f_m が 1 GHz の場合, 計測のばらつきは, f_m が 25 GHz の 場合と比較して約 10 倍の数 μ m である.

測定対象物に合わせて Fig.9(b)のように複数のスキャナを提供している. ビーム直径が 100 µm で 1 軸 90 mm 幅の光学スキャナと直線ステージを組み合わせた L90,40 mm 角の 2 軸光学スキャナでビーム直径 60 µm を走査する S40,走査エリアが 5 mm 角でビーム直径が 22 µm である高解像型の M5 というのが主な 形式である. L90 は比較的大きな部品を対象と考えており,主に fm が 1 GHz の光源を組み合わせている. どのスキャナもテレセントリック光学系が用いられておりスキャナ側から測定対象物に向かって鉛直に集光 ビームを照射するようになっている. 他にビーム進路を 90 度折り曲げるミラーを回転させて円筒内面をな ぞるようにスキャンする装置や S40 と直角プリズムミラーを組み合わせて円筒内径を計測する光学系など も提供している. レンズ,スキャナやステージ等に起因する歪みに対しては、キャリブレーションによる補 正を行っている. インラインの検査器として使用する場合にはステージ以外の部分を工場側の設備に接続し て搬送機に連動した計測が行われる.生産ライン制御機器とのインターフェイスを経由して指令を受けて計 測を実行、三次元形状データまたは OK/NG 判定結果を戻す.標準的な測定時間は、S40 の場合、縦横





Fig. 9 (a) Optical Comb 3D profile measurement system (L90), (b) Scanning heads. (Left) L90, (Middle) M5, (Right) S40.

40 mm×40 mm の範囲, 測定ピッチ 50 µm, 平均数 4 の条件で 8.6 秒, L90 の場合, 縦横 90 mm×200 mm の 範囲, 測定ピッチ 100 µm, 平均数 4 の条件で 27.6 秒である.

6.2 測定例

ステレオ法,共焦点,TOFカメラなど様々な光学式三次元計測技術が成熟しつつある中で光コム干渉を 用いた計測の特徴は同軸,高速及び高精度である.同軸計測ゆえに光学系の設計次第で作動距離(Working distance)を大きくとれて,深い穴の底や穴の側面形状も計測できる.Figure 10(a)は自社で行った自動車エ ンジンのシリンダーヘッドの燃焼室の形状測定例である.使用した形状計測器はL90システムである.測



Fig. 10 (a) Measurement example of cylinder head using L90 system. (b) Measurement example of a step master using S40 system. Color bar shows the height along Z-axis. (c) The cross section of the step master measurement example (b) at the 1 µm step.



定された形状から燃焼室部分を抽出して容積を計算できる. 燃焼室容積の繰り返し測定において標準偏差が 0.01 cc を切る実例もある. Figure 10(b)は S40 システムによる段差マスタの表面形状測定例である. Figure 10(c)に段差マスタ測定結果の段差 1 µm 部分の断面図を示す. 1 µm の段差まで明確に分解できていること がわかる.

また少し特殊ではあるが、日本原子力研究開発機構(現在の量子科学技術研究開発機構:QST)で核融合 中性子源用の高速液体リチウム流の長期安定性実証実験が行われ、光コム距離計が応用されている¹³⁾.従 来の接触式の波高計測法に比べて精度の1桁向上となる 0.02 mm の精度が達成された.

光三次元計測に共通な特徴であるが、機械加工された金属表面のように浸み込みのない適度な拡散反射面 は最も計測しやすい対象である.塗装面、プラスチックなどの金属以外の場合は材料の光学特性に依存す る.計測誤差を減らすためには表面からの反射光を選択的に取得するような条件を作る必要がある.鏡面反 射体の場合、正対した条件ならば精度よく測定できるが傾斜や湾曲の大きな鏡面は反射光が得られないので 測定が難しい.また光コム干渉信号の処理が単一距離からの反射を仮定したアルゴリズムであるため、多重 反射を発生する膜状の半透過性材料や可干渉性を大きく低下させる多孔質などは誤差が大きくなる傾向があ る.光コム干渉計は OCT の新技術として提案された技術が基になっているので複数反射の情報がすべて干 渉信号に含まれる.測定対象や内容拡充の為には光コムからの情報取得機能の向上が望まれる.

7. まとめと展望

電気光学変調型光コム発生器とその光コム光源を用いる距離計,形状計測機について,動作原理と測定例 を紹介した.飛行時間計測(TOF)を原理とする光学式距離計としては,光強度変調の直接検波を利用する 従来方式と比べて速度と精度が大幅に向上している.計測再現性と正確さが1µmで,多義性距離(L_a)以 内の計測は500 kHz の繰り返し周波数で実行される.長距離でも約1kHzで測定できる.光コム形状計測機 は同軸光学系での計測,長い作動距離,高速なデータ取得,高精度などの特長を有しており,自動車関連の 中大型部品,精密加工部品のインライン自動検査での利用が始まっている.

中大型部品は画像検査で対応できない複雑形状などが要因となって未だ人の官能検査に依存している例が 多い.また従来の高精度非接触形状検査は長い測定時間を要するためオフラインの抜き取りで行われること が一般的だった.光コム技術による三次元形状計測は計測精度と速度を両立することによりそれら問題を解 消し,検査自動化を推進するものと期待している.今後は、より一層の速度と精度の向上,自動車部品以外 の分野・用途の開拓,現時点で測定困難な材料に対する適用範囲の拡大などが課題である.

非接触・非破壊での高精度三次元形状計測は、検査自動化だけでなく、加工精度の向上にも付加価値を提 供できる.加工プロセスの合間に当技術を導入することで設計値と実形状の差が求められる.補正加工によ り不良率の低下,生産工程の効率化にもつながる.ノーベル物理学賞を支えた光コム技術が広く社会実装さ れ、環境・経済・社会への負荷軽減に貢献するという日が一日でも早く到来することを願っている.

引用文献

- 1) M. Kourogi, K. Nakagawa, and M. Ohtsu, "Wide-Span Optical Frequency Comb Generator for Accurate Optical Frequency Difference Measurement," IEEE J. Quantum Electron. **29** (10), 2693–2701 (1993).
- 2) J. L. Hall, "Nobel Lecture: Defining and measuring optical frequencies," Rev. Mod. Phys. 78 (4), 1279–1295 (2006).
- 3) T. W. Hänsch, "Nobel lecture passion for precision," Rev. Mod. Phys. 78 (4), 1170-1187 (2006).
- 4) T. Kobayashi, T. Sueta, and Y. Matsuo, "High-repetition-rate optical pulse generator using a Fabry-Perot electro-optic modulator," Appl. Phys. Lett. **21** (8), 341–343 (1972).
- 5) K. Imai, B. Widiyatmoko, and M. Kourogi, "High finesse waveguide cavity optical frequency comb generator," Proc. the 30th European Conf. on Opt. Commun., We4. PP. 044, (2004).
- 6) 国内特許, 特許第 5231883 号. (2008).
- 7) 今井一宏,興梠元伸,寺田聡一,"変調型光コムを用いた精密距離計測器,"レーザー研究. 42 (9),716-721 (2014).
- 8) S. J. Lee, B. Widiyatmoko, M. Kourogi, and M. Ohtsu, "Ultrahigh Scanning Speed Optical Coherence Tomography," Japan J. Appl. Phys. 40 (8B), L878-880 (2001).
- 9) O. P. Lay, S. Dubovitsky, R. D. Peters, J. P. Burger, S.-W. Ahn, W. H. Steier, H. R. Fetterman, and Y. Chang, "MSTAR: a sub micrometer absolute metrology system," Opt. Lett. 28 (11), 890–892 (2003).



- I. Coddington, W. C. Swann, L. Nenadovic, and N. R. Newbury, "Rapid and precise absolute distance measurements at long range," Nature Photonics. 3, 351–356 (2009).
- P. Trocha, M. Karpov, D. Ganin, M. H. P. Pfeiffer, A. Kordts, S. Wolf, J. Krockenberger, P. Marin-Palomo, C. Weimann, S. Randel, W. Freude, T. J. Kippenberg, and C. Koos, "Ultrafast optical ranging using microresonator soliton frequency combs," Science. 359 (6378), 887–891 (2018).
- 12) P. E. Ciddor, "Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared," Appl. Opt. 35 (9), 1566-1573 (1996).
- 13) T. Kanemura, H. Kondo, T. Furukawa, Y. Hirakawa, E. Hoashi, S. Yoshihashi, H. Horiike, and E. Wakaia, "Measurement of Li target thickness in the EVEDA Li Test Loop," Fusion Engineering and Design. 98–99, 1991–1997 (2015).



今井一宏

1971年12月生.1994年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業.1999年東京工業大学大学院総 合理工学研究科博士課程終了.工学博士.1999年(独)理化学研究所フォトダイナミクス研究セン ターフロンティア研究員,01年(独)理化学研究所基礎科学特別研究員.03年(株)光コム研究所 (現 株式会社 XTIA)入社.08年同取締役.光コム応用製品の研究開発に従事.応用物理学会会 員.





特集 産業応用ライダー

車載ライダーの動向

鷲尾 邦彦

パラダイムレーザーリサーチ (〒195-0072 東京都町田市金井 7-7-35)

Trends in automotive LiDARs

Kunihiko Washio

Paradigm Laser Research, 7-7-35 Kanai, Machida, Tokyo 195-0072

(Received June 17, 2022; revised July 26, 2022; accepted August 8, 2022)

A brief overview on the market and technology trends in automotive 3D LiDARs is given. Emphasis is placed on semi-solid-state LiDARs and all solid-state LiDARs toward advanced passenger cars with conditional driving automation of Level 3 or high driving automation of Level 4. Several recent examples of passenger cars equipped with LiDARs and automotive LiDARs adopted for passenger cars are shown in tables. Recent development trends on non-mechanical-scanning-type, all solid-state LiDARs are also briefly explained.

キーワード: ライダー, 車載, 3次元, 動向, 走査 Key Words: LiDAR, Automotive, 3-Dimension, Trends, Scanning

1. はじめに

3次元ライダーは、カメラやレーダーでは識別困難な遠方に存在する種々の物体の形状や移動体の移動速 度などを迅速に把握することに適しており、自動運転車用センサー群にとって要のセンサーになると考えら れている.

米国 DARPA(国防高等研究計画局)の主催により 2005 年にネヴァダ州モハーヴェ砂漠において実施され た自動走行に関するコンペでは、2次元ライダー(SICK LMS-291)を5 個搭載した Stanford 大学の自動運 転車 Stanley が優勝したが¹⁾,同年に、64 個の半導体レーザーを搭載した 360° 旋回型 64 ビームの 3 次元ラ イダーが Velodyne 社により開発され、その後まもなくして、これに改良を加えた高性能な Velodyne HDL-64E が出現した.米国 DARPA の主催により、カリフォルニア州の空軍基地において 2007 年に実施さ れた市街地を模した自動走行のコンペ(Urban Challenge)では、優勝した Tartan Racing(Carnegie Mellon 大 学と GM 社との連合チーム)及び 2 位となった Stanford Racing チームを含め、合計 12 チームの自動運転車 の屋根にこの HLD-64E が搭載されていた²⁾.

2009年には、Google 社が自動運転車の開発チームを秘密裏に発足させたが、これが後に同社からスピン オフした Waymo 社へと発展した¹⁾. 2009年の Google におけるチーム発足以降、Waymo 社の公道での総走 行距離は、2020年1月には 2,000万マイル(約 3,200万 km)に達した^{†1}. なお、同社は 2018年に公道での 総走行距離 1,000万マイルを達成しており、わずか1年で総走行距離を倍増させた. 同社は、2020年からア リゾナ州の人口 30万人未満の都市 Chandler にて、自動運転車によるタクシーサービスを提供している.

^{†1}K. Wiggers: Waymo's autonomous cars have driven 20 million miles on public roads, Jan. 6, 2020, https://venturebeat. com/2020/01/06/waymos-autonomous-cars-have-driven-20-million-miles-on-public-roads/ (Accessed 2022.6.6)



Waymo 社の自動運転車の屋根には、恐らく自社開発によると思われるマルチビーム 360° 旋回型ライダーが 搭載されている^{†2}.

2022年6月には、これまで長年にわたりサンフランシスコにて自動運転車の公道走行試験を行ってきた GM 社傘下の Cruise 社が、その公道走行実績が公的に評価され、大都会では始めてとなる、乗客から運賃が 得られる有料のタクシー運行ビジネスを開始できることになった^{†3}. 同社の自動運転車は、Chevrolet Bolt と いうモデルの電気自動車をベースにしており、この自動運転車の屋根には、Velodyne HDL-64E よりはかな り小型な、360°旋回型のライダーが5個程度搭載されている^{†4}.

無人の自動運転車は、比較的低速度での商品配達サービス用として、既に営業に使用されている. Nuro 社の第3世代の配達サービス用自動運転車R3は、重量約227kgまで積載でき、また46.7℃までの加熱 や-5.6℃までの冷蔵が可能であり、最大走行速度は72km/hまでが可能である⁺⁵. この配達サービス用自動 運転車の屋根及び側面などに総個数は不明であるが、小型な360°旋回型のライダーが複数搭載されている.

自動運転車の普及による米国経済への寄与は, 混雑解消による生産性向上, 交通事故削減, 燃費節減など により, 総額約 1.3 兆ドルに達するであろうと, 2013 年に Molgan Stanley 社により報告された³⁾. この報告 書によれば, 2022 年頃までには完全自動運転が実現でき, 2023 年からは完全自動運転の普及期に入るであ ろうと予測されていたが, 後述するごとく, この完全自動運転の将来予測はかなり楽観的であったことが分 かる.

Velodyne HDL-64E は、3 次元データ取得性能が高かったが、総重量が 13 kg 以上と重く、かつ価格が 8 万 ドル程度と極めて高価であったため、自動運転車の普及のためには、ライダーの小型・低価格化が必須であ ると考えられ、2016 年には Velodyne 社は測定可能距離 200 m で総重量 600 g の小型な 360° 旋回型ライダー VLP-32A を開発し、自動車業界向けの大量生産時には価格を 2 桁程度低減した単価 500 ドルでの提供が可 能であると発表した⁴⁾. このような背景の下、2016 年頃までには、車載用ライダー技術の開発を目指して、 多くのスタートアップ企業が参入し、例えば OPA(Optical Phased Array)技術の開発により、メカレスの全 固体型ライダーが実現でき、量産時には 250 ドルの小型で安価な車載ライダーを提供できる可能性があると 説いていた Quanergy 社の企業価値は、一時、15.9 億ドルと評価されたこともある⁴⁾.

360°旋回型ライダーは,機械式ライダーであり,回転摩擦等による寿命の問題や耐震性が劣るという課題があるため,光源や検出器などは固定し,小型光学部品の回転や MEMS 等の微振動よって光軸を走査する半固体型ライダーや,可動部が全くない全固体型ライダーの開発が活発化している.

このような半固体型ライダー及び全固体型ライダー用には、測距方式に関しては、パルスレーザーを用い るダイレクト ToF (Time of Flight) 並びに変調した連続波を用いる FMCW (Frequency-Modulated Continuous Wave) 及び RMCW (Random-Modulation Continuous Wave) などの諸方式が開発されている. レーザーの種 類に関しては、EEL (Edge-Emitting Laser),VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers), ファイバレー ザーなどの多種が採用されている. またレーザー波長に関しては、NIR (Near Infrared) 域の 905 nm など や、SWIR (Short-Wave Infrared) 域の 1,550 nm などが採用されている. また、走査方式については、2次元 走査、1次元走査と1次元フラッシュの併用、2次元フラッシュなどの諸方式が採用されている. また光検 出器については、p-i-n フォトダイオートや、APD (Avalanche Photodiode), SPAD (Single-Photon Avalanche Photodiode), Si-PM (Silicon Photomultipliers) などの種々のものが採用されている. これらの組合せによる

^{†2}R. Amadeo: Google's Waymo invests in LIDAR technology, cuts costs by 90 percent. Waymo is developing hardware and software to make the self-driving car a reality, Jan. 10, 2017, https://arstechnica.com/cars/2017/01/googles-waymo-invests-in-LiDAR-technology-cuts-costs-by-90-percent/ (Accessed 2022.6.7)

^{†3}J. Oliva: GM's Cruise is the first driverless taxi operating in a major US city. A fleet of 30 Chevrolet Bolt taxis will be operating in San Francisco, California, June 04, 2022, https://www.motor1.com/news/590053/gm-cruise-driverless-taxi-california/ (Accessed 2022.6.6)

^{†4}A. Krush: Why making driverless cars is hard - and why you may have to wait indefinitely for them, May 23, 2019, https:// www.objectstyle.com/machine-learning/state-of-driverless-car-software-2019 (Accessed 2022.6.6)

^{†5}M. Gauthier: Nuro introduces third-gen autonomous delivery vehicle, features sleekier styling and external air bag, Jan. 12, 2022, https://www.carscoops.com/2022/01/nuro-introduces-third-gen-autonomous-delivery-vehicle-features-sleeker-stylingand-external-air-bag/ (Accessed 2022.6.6)



ライダー構成の具体化には多様なアプローチがあり、それら多様なアプローチによる車載ライダーについて、これまでに多くの解説がなされている⁵⁻¹¹⁾.

360° 旋回型機械式ライダーは技術がかなり成熟しており、ロボタクシー用や商品配達サービス用ロボ カーなどに搭載されているものの、価格、寿命及び外観などの観点から、大量生産されている自家用乗用車 への搭載は困難であると考えられるので、ここでは360° 旋回型機械式ライダーに関する説明は省き、半固 体型ライダー及び全固体型ライダーに的を絞って、それらの市場動向及び技術動向に関して解説する.

2. ライダーの市場動向

2.1 自動運転車の市場予測

自動車へのライダーの搭載数は,自動運転車のレベルによって異なり,自動運転車のレベルが高くなるほ どライダー搭載数が増加するものと考えられるので,まず自動運転車の市場動向についてその概要を把握し ておく必要がある.

自動運転車のレベルは、国際規格 ISO/SAE PAS 22736(SAE J3016と同等)で定められている¹²⁾. これに よれば、レベル0:自動運転なし、レベル1:運転支援、レベル2:部分的自動運転、レベル3:条件付自動 運転、レベル4:高度自動運転、レベル5:完全自動運転、である. ドライバーによる監視が常時必要な場 合はレベル2以下であり、レベル3以上ではシステムによる監視がなされる. レベル3では、システムから の介入要求に対して、ドライバーが適切に対応することが必要である. レベル4では、特定条件化におい て、システムが全ての運転タスクを実施する. レベル5では、常にシステムが全ての運転タスクを実施す る.

Waymo 社, Gruise 社, Argo 社, Aurora 社等によるロボタクシーや商品配達用のロボカー, ロボトラック 等の開発は,いきなりレベル4での商用化を目指して行われているが,既存の大手自動車メーカーによる自 家用乗用車の技術開発はステップアップ型であり,レベル2,レベル3を介してのレベル4, さらにはレベ ル5の自動運転の実現を目指している.

これまでは ADAS (Advanced Driver Assitance System)は、先進運転支援システムと訳されており、ドラ イバーの操作を支援する機能として位置づけられており、ADAS が提供する機能はレベル1及びレベル2に 相当すると考えられている。しかし、上記国際規格 ISO/SAE PAS 22736 の 5.2 運転支援の注記3 (Note 3) によれば、ADAS という用語は広範な内容を含むので技術的定義付けを行うのは適当でないとして、ADAS という用語については定義がなされていない。したがって、ADAS レベル 4、ADAS レベル 5 といった表現 が出現しても不思議ではない^{16,17}. ここでは、Yole Development 社及び Woodside Capital Partners 社ら^{†7} の用 語の使用例にならって、ロボタクシーなどの商用車と区別するために、自家用乗用車については、ADAS 車 と呼ぶことにする。従って、レベル 4 以上の自動運転車には、レベル 4 以上の商用車及び ADAS 車が含ま れることになるが、レベル 4 以上のセンサーの価格の低下傾向が緩慢なので、レベル 4 以上の商用車は少量 ながらすでに出荷されているものの、レベル 4 以上の ADAS 車が量産されて浸透率が 2% を超える時期は、 かなり後になるものと予測される.

残念なことに、2018年に、米国・アリゾナ州において、タクシー会社所有の自動運転車が走行中、走行 試験従事者の不注意により、死傷事故が発生したこと^{†8}や、2020年には、コロナ禍の拡大を防止するため に、多数の企業が自動運転車の走行試験を中断したことなどにより、レベル5の完全自動運転を目指した動 きは頓挫し、特定条件を満たした場合のみに適用可能なレベル4に限定した開発にAV(Autonomous Vehicle)業界がシフトしたため、レベル5の完全自動運転車の普及は、概ね2035年以降とかなり先になるもの と考えられている¹³⁾.

^{†6}Anonymous: Mobility experience (MX) concepts, https://tech.toyota-boshoku.com/global/innovation-design/mx-concepts. html (Accessed 2022.6.7)

^{†7}Anonymous: The automotive LiDAR market, April 2018, Yole Development and Woodside Capital Partners, https:// d19j0qt0x55bap.cloudfront.net/production/onboardings/5e5421415aaa397b552399b4/documents/file/Yole_WCP-LiDAR-Report_April-2018-FINAL.pdf (Accessed 2022.6.7)

^{†8}Anonymous: Uber's self-driving operator charged over fatal crash, Sep. 16, 2020, https://www.bbc.com/news/technology-54175359 (Accessed 2022.6.7)



コロナ禍が広がる以前の 2019 年 1 月に出版された自動運転の将来予測に関する報告書¹⁴⁾によれば,自動 運転車の販売台数の伸びは,2030 年以前は緩慢であり,2030 年以降のいずれかの年において立ち上がりの キンクが生じ,それ以降は販売台数が急速に伸び,2040 年には33 百万台に達するとのこと.2020 年に拡大 したコロナ禍による影響を考慮に入れると,自動運転車の普及時期は上記の予測よりもさらに若干遅れる可 能性がある.しかし,後述するように,高速道路上での混雑時の低速走行用など限定した条件下でのレベル 3 の自動運転が2020 年から2022 年にかけて,日本,ドイツ,中国などで合法化されたため,主にレベル3 の ADAS 車向けに,ライダー搭載の動きが,欧州,日本,中国等で2021 年以降にわかに活発化している. このため,2022 年は,ADAS 車向け車載ライダーの量産元年とみなせる状況になりつつある.

2.2 車載ライダーの市場予測

2.2.1 用途別ライダーの市場動向

2022 年 5 月にオンラインで開催された EPIC Online Meeting on LiDAR Miniaturization と題した会合におけ る Yole Development 社によるライダー市場の展望に関するプレゼン資料¹⁹ によれば、2019 年から 2026 年ま でのライダー市場について、用途別(ADAS, Robotic Cars, Logistics, Smart infrastructure, Manufacturing, Wind, Topography)に、それぞれ売上高及び台数の年次推移のデータが紹介されている。これによれば、2021 年 から 2026 年にかけての用途別売上高の CAGR(年平均成長率)は、それぞれ、94%、32%、19%、38%、 4%、2%、6% であり、ライダーの全用途の総売上高の CAGR は 23% である。2021 年における総売上高は、 20.02 億ドルであり、用途別の売上高(単位百万ドル)は、それぞれ 85、146、195、78、307、45、1,146 で ある。これに対して、2025 年における総売上高は、43.59 億ドルであり、用途別の売上高(単位百万ドル) は、それぞれ 1,387、470、403、252、352、48、1,447 である。また、2026 年における総売上高は、57.18 億 ドルであり、用途別の売上高(単位百万ドル)は、それぞれ 2,318、575、466、466、395、379、49、1,534 である。2021 年における Topography(地形等の測量)用のシェアは 57.2% と高く、トップシェアであるが、 2026 年には、ADAS 車用がシェア 40.5% となり、トップシェアとなっている。

また, 上記プレゼン資料によれば, 2021 年から 2026 年にかけての用途別出荷台数の CAGR は, それぞれ 108%, 52%, 37%, 32%, 10%, 5%, 9% である. 2021 年における総出荷台数は 3.7 億台であり, 用途別出 荷台数(単位千台)は、それぞれ143,27,55,60,67,0.372,18である.これに対して、2025年におけ る総出荷台数は 37.68 億台であり、用途別出荷台数(単位千台)は、それぞれ 3,110, 150, 225, 157, 99, 0.452, 26 である. また, 2026 年における総出荷台数は 64.57 億台であり, 用途別出荷台数(単位千台)は, それぞれ 5,599, 216, 266, 238, 110, 0.475, 29 である. ADAS 車用は, 2020 年以前は出荷台数が小さく, 出荷台数ベースでのトップシェアは Manufacturing(製造)用であったが、ADAS 車用は CAGR がきわめて 大きいため、2021 年には出荷台数のシェアが 38.6% となり、トップシェアとなった.2025 年及び 2026 年 における出荷台数ベースでの ADAS 車用のシェアは、それぞれ 82.5%、86.7% である. ちなみに、ADAS 車 用及び Robotic cars 用のライダーの単価(単位千ドル)を計算してみたところ, 2021 年ではそれぞれ 0.59, 5.4 であった.また、2025年におけるそれら用途別の単価(単位千ドル)は、それぞれ 0.446、3.133 であ る. また, 2026年におけるそれら用途別の単価(単位千ドル)は, それぞれ 0.414, 2.662である. ADAS 車用及び Robotic casr 用のライダーは、いずれも低コスト化が進展しているが、ADAS 車用に対する Robotic cars 用ライダーの相対的価格比は、2021年は約9.2、また2025年及び2026年はそれぞれ7.02、6.43であ る. Robotic cars 用ライダーのほうが ADAS 車用ライダーよりも低コスト化が顕著に進むものの、その単価 は、2026年においても ADAS 車用に比べて依然としてかなり高価であることが分かる.

Yole Development 社と Woodside Capital Partners 社は、2018 年 4 月に共同で車載ライダー市場に関して報告した¹⁷. そのプレゼン資料には、2016 年から 2032 年までの長期について、ADAS 車用及び Robotic cars 用について、出荷金額及び出荷台数の年次推移のデータが詳しく紹介されている. これによれば、例えば ADAS 車用の 2021 年、2025 年及び 2026 年の出荷金額(単位百万ドル)は、それぞれ 176、1,535、2,532 であるのに対して、Robotic cars 用の 2021 年、2025 年及び 2026 年の出荷金額(単位百万ドル)は、それぞれ

^{†9}A. Debray: LiDAR market overview, EPIC Online Technology Meeting on LiDAR Miniaturization, May 9, 2022, https://epicassoc.com/wp-content/uploads/2021/12/Alexis-Debray-Yole-Developpment.pdf (Accessed 2022.6.8)



1,614, 4,655, 5,075 となっており, Robotic cars 用の出荷台数のほうが ADAS 車用のそれよりもかなり大き な出荷額になると予測されていたことが分かる. このプレゼン資料¹⁷ によれば, ADAS 車用の出荷額が Robotic cars 用の出荷額を初めて上回るのは 2029 年である.

前述した Yole development 社の 2022 年 5 月のプレゼン資料¹⁹ と 2021 年の出荷金額を比較してみると, ADAS 車用の出荷金額は,2018 年に予測した出荷金額の約 0.483 倍であるのに対して,Robotic cars 用の出 荷金額は,なんと 0.09 倍となっており,これまでに予測されていた市場規模が大幅に縮小してしまったこ とが分かる.Robotics car 用の出荷金額の予測が大幅に縮小した理由は,前述したごとく,タクシー会社所 有の自動運転車が走行中,走行試験従事者の不注意により,死傷事故が発生したこと¹⁸ や,2020 年には, コロナ禍の拡大を防止するために,多数の企業が自動運転車の走行試験を中断したことなどにより,レベル 5 の完全自動運転を目指した動きが頓挫したことなどによるものと考えられる.

Strategy Analytics 社による車載ライダーに関する 2021 年 9 月 7 日付けのレポート¹⁵⁾には、ラスト 1 マイ ルの短距離自動運転シャトルや公道以外を走行する荷物運搬車及び重量 6 トン以上の大型車などを除外した 比較的軽量な新車向けの公道走行用高分解能ライダーの 2018 年から 2028 年までの世界主要地域別の出荷台 数の予測が記載されている.これによれば、例えば 2021 年、2025 年、及び 2026 年の総出荷台数(単位千 台)については、それぞれ 188、3,025、5,111 となっている.これらの値を、前述した Yole Development 社 による 2022 年 5 月のプレゼン資料^{†9} に記載されていた ADAS 車用の 2021 年、2025 年、及び 2026 年の出荷 台数(単位千台)、それぞれ 143、3,110、5,599 と比較してみると、出荷台数に関する市場予測には、それほ ど大きな相違がないことが分かる.

上述した Strategy Analytics 社のレポートによれば¹⁵⁾,地域別の出荷台数のトップは,2026 年までは欧州 であるが、2027 年以降は中国がトップになると予測されている.ちなみに、2028 年の総出荷台数は9,707 千台であるが、同年の地域別シェアは、中国 30.0%、欧州 29.3%、NAFTA(北米 3 ケ国)23.8%、日本 9.76%、韓国 6.97%、その他 0.06%、がそれぞれ予測されている.

中国におけるライダー関係の情報をインターネットで検索してみると、中国語で記載されたブログ等で は、Frost & Sullivan 社のレポートを出典元としたライダー市場規模に関する記載がかなり多く見られる.し かし同社の英文の原著レポートは高価であるため、原著に当たって直接確かめることはあきらめざるを得な い.間接情報になるが、中国系ライダーメーカーである Neurvision 社のブログ^{†10} によれば、Frost & Sullivan 社は、2025 年におけるライダーの世界市場規模は 135.4 億ドル、2019 年から 2025 年までの年平均成長率は 64.5%、このうち 2025 年の中国の市場規模は 43.1 億ドルであると予測している.これらのライダーは、車 載用のほかに、地形測量用など他の用途も含んでいると考えられ、前述した Yole Development 社の 2022 年 5 月のプレゼン資料^{†9} に記載されていた 2025 年における全用途向けライダーの総出荷額 43.59 億ドルと比較 してみると、Frost & Sullivan 社が予測した同年の市場規模は、Yole development 社が予測した市場規模の 3.11 倍であることが分かる.新規ビジネスに強気な中国系企業は、市場規模が大きめの Frost & Sullivan 社 による予測値のほうを好んでいるのかも知れない.

車載用ライダーに関して多くのブログを寄稿している Patience Consulting 社の Rangwala 氏の調べによれ ば^{†11}, ADAS 車, AV (自動運転車),及びトラック向けの TAM (Total Available Market) に関して報告して いる市場調査レポートによる市場規模の平均値は、2025 年が約 106 億ドル、2030 年が約 310 億ドルとのこ と.また、2025 年にはレベル 3 及びレベル 4 の車が 8 百万台、レベル 4 のトラックが 57 千台出荷されると 想定されており、ライダーの価格は、自動車 1 台当たり 1,300 ドルとなること、また 2030 年には、レベル 3 及びレベル 4 の車が 21 百万台、レベル 4 のトラックが 4 百万台出荷され、自動車 1 台あたりのライダー価 格は 1,400 ドルになることなどが述べられている。2025 年よりも 2030 年のほうが自動車 1 台あたりのライ ダー価格が高くなる理由は、レベル 3 の車よりも多数のライダーを必要とするレベル 4 の車の比率が高まる ためであるとしている。

^{†10}Neuvision, Inc: Insight on LiDAR industry chain, March 18, 2021, https://www.neuvition.com/media/blog/LiDAR-industrychain.html (Accessed 2022.6.8)

^{†11}S. Rangwala: LiDAR: Lighting the path to vehicle autonomy. Automotive LiDAR is a brutal but exciting business, and there will be big winners, just like there were in the fiber optics boom-and-bust period 20 years ago, March 1, 2021, https://spie. org/news/photonics-focus/marapr-2021/LiDAR-lighting-the-path-to-vehicle-autonomy?SSO=1 (Accessed 2022.6.8)



2.2.2 ライダーのタイプ別市場動向

ライダーのタイプは、機械的走査の有無および走査の動作原理などによって、(レーザー光源 360° 旋回型 の)機械式、(レーザー光源は固定だが、回転鏡等でビームの出射方向を機械的に走査する)半固体型、及 び機械的駆動機構を全く含まない全固体型の3タイプに大きく分類できる.ビームの走査に MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)を用いる MEMS 走査型ライダーは、MEMS の駆動部が極めて微小であること から、全固体型ライダーの範疇に含めるという考え方と、微小とはいっても MEMS には駆動部が存在する ので、半固定型ライダーに含めるという二通りの考え方があるので、MEMS 走査型ライダーの位置づけに は注意が必要である。全固体型ライダーには、ビーム走査部を全く含まないフラッシュライダーと、OPA (Optical Phased Array)などの光学的な手段によりメカレスにビームを走査するメカレス光学走査方式固体 ライダーとがある、メカレス光学的走査手段には、後述するように OPA のほかにも複数の走査手段がある が、とりあえず市場動向に関する議論においては、メカレス光学的走査手段の詳細な区別は問わずに、それ らを一括して OPA の範疇とみなすことにする.

前述した Yole Development 社と Woodside Capital Partners 社とが,2018年4月に共同で車載ライダー市場 に関して報告したプレゼン資料^{†7}には、半固体型ライダーを含んだ全機械式ライダーと全固体型ライダーと に分けて、2016年から2032年にかけての、ADAS車用及び Robotic car 用のライダーの出荷額及び出荷台数 について、年次推移を予測している。このプレゼン資料においては^{†7}、MEMS 走査型ライダーは、全固体型 ライダーの範疇に含めている。これによれば、Robotic car 用については、例えば、2025年における全機械 式ライダー及び全固体型ライダー(メカレス光学的走査機能を有した固体型ライダー及びフラッシュライ ダー)の売上高(単位百万ドル)は、それぞれ4,582、73であり、全固体型ライダーのシェアは1.6%未満 である。2032年については、それぞれ6,719、1,492であり、全固体型ライダーのシェアは18.2%程度まで 高まると予測されている。一方、ADAS車用については、例えば、2025年における全機械式ライダー及び 全固体型ライダー売上高(単位百万ドル)は、それぞれ1,312、223であり、全固体型ライダーのシェアは 約15%である。この値は、同年における Robotic car 用全固体型ライダーのシェアに比べて、10倍弱大き い、また、2032年については、ADAS車用の全機械式ライダー及び全固体型ライダー売上高(単位百万ド ル)は、それぞれ2,068、7,550であり、全固体型ライダーのシェアは約78.5%にまで高まるものと予測さ れている。

ABI Research 社は、交通や人流等を監視するスマートシティ用や、防犯などのセキュリティー用、工場内 等での物品搬送監視などの産業用などに使用されるライダーを IoT ライダーと位置づけ、IoT ライダー及び 車載ライダーの設置ないし搭載数の 2020 年から 2030 年にかけての年次推移を予測している¹⁶⁾. これによ れば、車載ライダーのほうが台数ベースでの成長率が高いものの、2020 年から 2030 年まで、常に IoT ライ ダーのほうが台数ベースで上回っており、2030 年では、車載ライダーは 12.95 百万台なのに対して、IoT ラ イダーは 15.98 百万台になると予測している.

また同社は、車載ライダーについては、機械式ライダー、MEMS 走査型及びフラッシュ型ライダー、及 びメカレスの光学的走査方式固体型ライダーに分けて、それらの 2020 年から 2030 年にかけての搭載台数の 年次推移を予測している。Fig. 1 に、それら車載ライダーの年次推移を示す¹⁶⁾. Fig. 1 における機械式 (Mechanical) ライダーには、全ての半固体型ライダーが含まれている。同社は、理想的な究極の車載ライ ダーはメカレス光学的走査方式の固体型(Solid State)ライダーであり、微小なサイズであっても機械的な 駆動部を含んだ MEMS 走査型ライダーや、遠距離までの測定に不向きなフラッシュライダーは、機械式ラ イダーとメカレス光学的走査方式固体型ライダーとの中間に位置する暫定的なライダーであると考えてい る. 非機械式ライダー(MEMS 走査型を含む)のシェアが機械式ライダーのシェアを初めて超える時期、 は 2025 年から 2026 年にかけての間が想定されている。メカレス光学的走査方式固体型ライダー(主として FMCW 方式ライダー)は、市場での立ち上がり時期が 2026 年頃と考えられており、2026 年以降の年平均 成長率はかなり高いものの、そのシェアは 2030 年になっても MEMS 走査型ライダー及びフラッシュライ ダーとからなる中間的位置づけのライダーには及ばないと考えられている。なお、メカレス光学的走査方式 固体型ライダーが搭載台数ベースで機械式ライダーにほぼ追いつくのは 2029 年頃と考えられている.





3. 車載ライダーの現状

3.1 市販乗用車へのライダー搭載状況

Table 1 に, ライダーを搭載した自家用乗用車(物流用トラックやロボタクシー等の商用車は除く)のい くつかの事例についての,搭載したライダーの種類及び搭載個数に関する一覧を示す.最近はライダーを搭 載した車種が急増しているため,それらすべてを網羅したものではないこと,及び搭載されたライダーの概 要について,自動車メーカーが詳しく公開することはあまりないので,種々の伝聞を含んだインターネット 情報を検索した結果をとりまとめたものであるため,記載内容に一部推測が含まれており,かならずしも記 載内容の全部が正しいかどうかは分からないということをお断りしておく.

Table 1 には、自動車メーカー 20 社の事例が記載されている.自動車メーカー数の国別内訳は、中国 11 社、ドイツ3社、米国3社、日本2社、スウェーデン1社であり、中国の自動車メーカー数が圧倒的に多 い.また、ライダーを搭載した車種は、圧倒的に電気自動車(EV)が多いようである.Table 1 に記載され たライダーの種類をみると、360°旋回型の機械式ライダー及びメカレス光学的走査方式全固体型ライダー が ADAS 車用に採用された事例は見当たらない.これまでのところ、ADAS 車用に採用されたライダーは、 いずれも半固体型ライダーないし(全固体型ライダーのうちの)フラッシュライダーのみである.

2017年に Audi が世界に先駆けて、Valeo 社製ライダー Scala 1を搭載したレベル 3 の機能を有する ADAS 車 A8 を発売したが、コストの問題等があり、その後しばらくライダーを搭載した ADAS 車が現れなかった^{†12}.

しかし、2021 年以降は、レベル 2 を高度化したレベル 2+や、より高度なレベル 3 の機能を有した ADAS 車が続々と生産されるようになった. ADAS 車には多くのセンサー(カメラ、レーダー、超音波センサーな ど)が搭載されているが、Tesla 社以外の多くの自動車メーカーは、高信頼度なレベル 3 以上の機能の実現 には、ライダーの搭載はほぼ必須と考えていると思われる. Yole Development 社のレポート¹⁷⁾によれば、 2021 年第 3 四半期時点で、自動車向けのライダー開発に携わっている企業数は 60 社以上あるが、このうち 既に自動車完成車メーカー(OEM: Original Equipment Manufacturer)に採用されたライダー社数は 14 社ある とのこと、車載用として採択された(Design win)件数は 29 件あるが、その件数ベースの比率で 1 位が Valeo 社 (28%)、2 位 が Robosense 社 (10%)、3 位 が Luminar 社、Livox 社、Denso 社、Continental 社、 Cepton 社 (各 7%) などである.

3.2 各種車載ライダーの動作方式及び主な仕様

Table 2 に、これまでに市販の乗用車に搭載されたか搭載が決まったと報道された車載用ライダーの種類

^{†12}J. Yoshida and M. D. P. Emilio: Audi A8 with Level 3 self-drive and LiDAR technology, May 21, 2020, https://www.eeweb. com/audi-a8-with-level-3-self-drive-and-lidar-technology/ (Accessed 2022.6.13)



		-				
Probable start year of production	Car manufacturer	Brand, Model	LiDAR manufacturer	LiDAR model	Presumptive, LiDAR type and features	Number of LiDARs per car
2017	Audi (Germany)	A8	Valeo	Scala 1	Mirror scanning (4 layers)	1
2021	Mercedes Benz (Germany)	S class	Valeo	Scala 2	Mirror scanning (16 layers)	1
2021	Honda (Japan)	Legend	Valeo	Scala 1	Mirror scanning (4 layers)	5
2021	Toyota (Japan)		Denso	(Front Lidar)	Mirror scanning (Range 200 m)	1
2021		(Japan)	Lexus LS	Continental	(HFL110 ?)	3D flash lidar (Range 20 m)
2021	Lucid (USA)	Air	Robosense	M1	MEMS scanning (Range 150m)	1
2021	Xpeng (China)	P5	Livox	HAP	Non-repetitive mechanical scanning	2
2022	NIO (China)	ET7 and ET5	Innovusion	Falcon	Mirror scanning $(\lambda \ : 1550 \ { m nm})$	1
2022	BMW (Germany)	iX	Innoviz-Magna	Innovizone	MEMS scanning (Range 150 m)	1
2022	SAIC (China)	R Auto ES33	Luminar	Iris	Mirror scanning $(\lambda \ : 1550 \ { m nm})$	1
2022	BAIC (China)	ARCFOX Alpha S Huawei HI Version	Huawei	(96 beam)	Mirror scanning (Range 150 m)	3
2022	GAC (China)	Aion LX Plus	Robosense	RS-LiDAR-M1	MEMS scanning (Range 150m)	3
2022	WM Motor (China)	M7	Robosense	RS-LiDAR-M1	MEMS scanning (Range 150m)	3
2022	Xpeng (China)	G9	Robosense	RS-LiDAR-M1	MEMS scanning (Range 150m)	2
2022	Changan Automobi l e (China)	AVITA 11	Huawei	(96 beam)	Mirror scanning (Range 150 m)	3
2022	Volvo (Sweden)	Embla	Luminar	Iris	Mirror scanning $(\lambda : 1550 \text{ nm})$	1
2022 ?	Great Wa ll Motor (China)	Wey Mocha	ibeo-ZF	ibeoNET	2D VCSEL arrays (Sequential flash)	3 (Long range 1 Medium 2)
2022	Li Auto (China)	L9	Hesai	AT 128	Hybrid solid-state (128 VCSEL arrays)	1
2022	Faraday Future (USA)	FF91	Velodyne	H800	"MEMS-like" solid-state lidar	2
2023	Generfal Motors (USA)	Nine different mode l s	Cepton-Koito	(Vista X90, to be modified)	Micro-motion tecnhnogy (MMT)	Unkown
2023	Geely Automotive	Lotus Eletre	Hesai	AT 128	Hybrid solid-state (128 VCSEL arrays)	2
	(China)		Robosense	RS-LiDAR-M1	MEMS scanning (Range 150m)	2

Table 1 Examples of ADAS passenger cars equipped with LiDARs


Table 2 Presumed operating principles and representative specifications of 3D LiDARs adopted for ADAS cars

LiDAR Provider & Model	Presumed scanning methodology	Layers (channels) in equivalent or 2D-pixel layout	FOV (H x V) (degree)	Angular resolution (degree)	Range (m) for 10% reflection	Frame rate (fps)	Wavelength (nm)
Valeo SCALA 2	Rotating-mirror-based 1D mechanical scanning	16 per scan 16+16 interlaced per scan pair	130° ×10°	Horizontal: 0.125° for $\pm 15^{\circ}$ (inner) 0.25° for outer lobes Vertical: 0.6°	100 @50% True positive rate	25	905
Livox HAP	(Risley-prism-based) non-repetitive scanning	Equivalen to 144 lines	120° x 25°	up to 0.16° x 0.2°	150	20	(905 ?)
Cepton Vista X90	Micro-motion technology (MMT)	Unspecified	90° x 25°	up to 0.13° x 0.13°	up to 200	up to 40	905
Luminar Iris	Precision 2 axis scanner using low-mass motor scanned mirrors	640 lines/s Software configurable	H: 120° V: 0~26°	Horizontal: Min.0.05° Vertical: Min.0.05°	250	1~30	1,550
Innovusion Falcon	2D-mirror scanning (using a rotating polygon mirror and a 1D scanning mirror ?)	1500 lines/s Software configurable	120° x 25° ROI size: 40° x 4.8°	Within ROI† region: Min: 0.05° x 0.05° Outside region: 0.18° x 0.24°	250	10	1,550
Innoviz Innovizone	2D-MEMS scanning	Unspecified (Equivalent to 250 lines?)	115° x 25°	0.1° × 0.1°	(~250) (Dependent on within ROI† or not, etc.)	Uniform FOV 10 fps FOV with ROI † 15 fps	905
Robosense RS-LiDAR-M1	2D-MEMS scanning	Unspecified (Equivalent to 125 lines?)	120° x 25°	0.2° × 0.2° (Average)	120	10	905
Huawei (96 beam)	Combination of 1D-mirror scanning and micro- MEMS 2D-scanning ?	96 beams	120° x 25°	0.25° x 0.26°	150	Undisclosed	Undisclosed (9xx nm?)
Hesai AT128	Rotating-mirror-based 1D mechanical scanning with 128 VCSEL 1D array	128 (Overall resolution: 1200 x128)	120° x 25.4°	0.1° × 0.2°	200	Frame rate ? (1.53 million poins/s)	905
Velodyne H800	MLA (Micro-Lidar Array achitecture) (Details are undisclosed)	Undisclosed (8 channel 905 nm edge emitting lasers are used)	120° x 16°? (Specifications are preliminary)	0.1°~0.25°? Undisclosed (Specifications are preliminary)	170 ? (Specifications are preliminary)	Undisclosed (Specifications are preliminary)	905
lbeo IbeoNext	Flash Using 128 x 80 VCSEL 2D array (All-solid-state)	Pure-electric sequential row scan 120 channel in parallel	Long range: 11.2° x 5.6° (7°)* Short range: 60° x 30° (37.5°) * * non-uniform resolution	Long range: 0.09° (0.04°)** x 0.07° Short range: 0.47° (0.23°)** x 0.38° ** interlaced	Long range: 150 (Short range: 40)	Typical 25 (Fully programmable)	885
Continental HFL110	Flash (All-solid-state)	128 x 32 (4096) pixels	120° × 30°	Unspecified (0.94° x 1.07°?)	< 50 ? (Reflectivity not specified)	25	1,064

† ROI: Region of Interest

並びにそれらの走査方式及び仕様の概要を示す. ライダーの具体的な装置構成や走査方式の詳細などはライ ダーメーカーのカタログに記載されていないことがしばしばあり,また,メーカーの仕様もバージョンアッ プ等でしばしば変更されるため,インターネットによる情報検索や特許検索などによる情報を加味して,と りあえず筆者が表にとりまとめたものであるが,記載内容の全てが,現時点において,実際に正しいのかど

^{†14}Neuvision, Inc.: Luminar's LiDAR is tested by Tesla?, June 3, 2021, https://www.neuvition.com/media/blog/tesla-testingluminars-lidar.html (Accessed 2022.6.13)

^{†13}Anonymous : $\nu - \# - \nu - \cancel{P} - (LiDAR)$ Iris, https://www.cornestech.co.jp/tech/products/products_luminar_lidar_iris/ (Accessed 2022.6.13)



うかは分からないということをお断りしておく. 例えば, Luminar 社製ライダー Iris の製品が紹介されてい るホームページ上では「水平視野角 120°, 垂直視野角 26°の 2 次元スキャンミラーを使用」という記載があ る^{†13} が, 同社からの出願特許の題目を調べてみると, 題目中にポリゴンという用語が含まれている特許が 数件あったので,少なくとも 1 軸のビーム走査は,ポリゴン回転が利用されている可能性がある¹⁸⁾. 一方, インターネット検索によれば,走査に MEMS ミラーが用いられているという書き込みもある^{†14}. しかし, 同社の英文のホームページ上に,性能とコストのバランスから考えて,(複数の)低質量の走査ミラーを用 いた 2 軸の機械式の走査が最適であると記載されているので,すくなくとも MEMS 走査は採用されていな いことは確かであろう^{†15}. なお, Huawei 社の 96 ビームのライダー(内製用なので,製品名は不明) につい ては,単なる機械的回転ミラーが用いられているという書き込みがある一方で^{†16},同社製ライダーに関す るインターネット上の中国系の評論では,同社製車載ライダーは年産 10 万台以上,価格は量産時 200 ドル 以下を目指しているという記載とともに,低価格化実現のために,同社が出願した MEMS2 次元走査方式の ライダー¹⁹⁾が同社製の車載ライダーにすでに採用されているに違いないと述べている書き込みも見られ る^{†17}. このため,同社製車載ライダーには,現在既に 2 次元走査用に MEMS ミラーが用いられている可能 性が高そうに思われるが,実機を入手してのティアダウンによる確認は容易でない.

前述した Yole Development 社のレポート¹⁷⁾によれば、車載用として採択された Design win 29 件の走査方 式別シェアは、機械式 66%、MEMS 走査方式 17%、フラッシュ方式 10%、不明 7% である。Table 2 に記載 した 12 社のライダーについて、走査方式別シェアをみてみると、機械式 50%、MEMS 方式 33%、フラッ シュ方式 17% となった。なお、ここでは、Huawei 社の 96 ビームのライダーは、MEMS 走査方式であろう とみなした。また、Velodyne 社のライダー H800 は、同社からは走査方式が開示されていないものの、 MEMS 類似の走査方式が採用されていると考えられるという記載のブログ^{†18} が見つかったので、ここでは この同社のライダーは MEMS の範疇に含めて走査タイプ別のシェアを計算した。

また、上記 Yole Development 社のレポート¹⁷⁾によれば、車載用として採択された Design win 29 件につい ての波長別シェアに関しては、905 nm が 69%、1,550 nm が 14%、1,064 nm が 7%、885 nm が 3%、不明が 7% としている. Table 2 に記載した 12 社のライダーについて、波長別のシェアを計算してみると、905 nm 58%、1,550 nm 17%、1,064 nm 8%、885 nm 8%、不明 8% となった. ここで、Livox 社のライダー HAP の波 長はおそらく 905 nm であろうとした. また、Huawei 社の 98 ビームのライダーについては、使用波長に関 する情報が全く見つからなかったので、使用波長は不明とした.

4. 車載用次世代全固体ライダーの開発状況

4.1 次世代全固体ライダーの種類

ここでいう次世代全固体ライダーは、機械的なビーム走査手段を用いない全固体ライダーであって、かつ スキャン機能を全く有しないフラッシュライダーを除外したものである.遠距離用ライダーには、背景光の 影響が大きく、かつ高ピーク出力が必要となる全面一括フラッシュ方式のライダーは適さないので、何らか の走査機構を含んだライダーのほうが次世代全固体ライダーにふさわしいと思われる.次世代全固体ライ ダーには、1次元ないし2次元の電子的スキャン機能を有した VCSEL アレイ²⁰⁾を用いたデジタル(フラッ シュ)ライダー並びに位相変調機能を有した光学的位相変調アレイ(OPA: Optical Phased Array)^{21,22)}及びレ ンズ焦点面に配置した、フォーカルプレーンスイッチアレイ(FPSA: Focal Plane Switch Array)²³⁾が含まれ

^{†15}M. Weed: Sensor(y) overload: Making sense of lidar, https://www.luminartech.com/sensory-overload-making-sense-of-lidar/ (Accessed 2022.6.13)

^{†16}S. Chen: Huawei LiDAR preview, Dec. 10, 2020, https://schen583.medium.com/huawei-lidar-preview-922dd2d72828 (Accessed 2022.6.13)

 ^{†17}Anonymous: J. Huawei takes action: Releases high-performance automotive-grade lidar with an annual output of 100,000 sets (in Chinese), Dec. 26, 2020, https://www.vzkoo.com/read/16c5debdd2694b24d41d1823700b926a.html (Accessed 2022.6.13)

^{†18}S. Abuelsamid: Velodyne's \$500 Velarray Solid-State Lidar Goes Into Production In 2021 Nov. 13, 2020, https://www.forbes. com/sites/samabuelsamid/2020/11/13/velodyne-announces-500-velarray-h800-lidar-production-in-2021/?sh=24197b146e8f (Accessed 2022.6.17)



る. FPSA を用いたビーム走査法は、LABS(Lens -Assisted Beam Steering)法とも呼ばれている²⁴⁾. メタ表面(Metasurface)を用いたビーム走査手段もいろいろ研究開発されており²⁵⁾, それらも広義的には OPA の範疇に含めるべきかも知れないが、Lumotive 社が開発した液晶メタ表面 LCM(Liquid Crystal Metasurface)による走査方式^{†19}は、他の OPA による走査方式と比べて、量産性がよく、かつ大口径化も比較的容易であることなど、優れた特性を種々備えているように思われるので、Spector 氏によるライダー用走査方式の分類²⁴⁾にならって、LCM については、他の OPA と区別して以下に解説する.

4.2 デジタル (フラッシュ) ライダー

Ouster 社は, 波長 850 nm の VCSEL アレイ及び SPADs アレイを用いたマルチビームフラッシュライダー OS-1 などをすでに市販していたが, それらの水平走査には 360° 旋回型機械式走査が用いられていた^{†20}. 同 社の 2022 年 5 月に発表された投資家向けプレゼン資料^{†21} によれば, 同社は, 機械的駆動部を全く含まない 全固体型デジタルライダー DF シリーズを現在開発中である. A-サンプルは 2022 年中に出荷されるが, 量 産は, B-サンプル, 及び C-サンプルの出荷及び評価を終えた後の 2025 年になる予定とのこと. 遠距離用及 び中距離用各 1 台, 並びに短距離用 3 台の合計 5 台のセットで, 多くの ADAS 機能が満たすことができ, 平均価格は 1 台あたり約 200 ドル, 1 セットで約 1,000 ドルが予定されている. なお, DF シリーズで使用 される VCSEL の波長が OS-1 と同様に波長 850 nm なのか, それとも波長 905 nm など別の波長が使用され るのかどうかなどを含めて, DF シリーズの仕様の詳細は不明であるが, ライダーのデータ取得速度として 13 M ポイント/s が予定されている^{†21} ので, かなり高精細な 3 次元像のデータが得られる全固体ライダーが 2025 年頃に入手可能になるものと推察される.

4.3 LCM 走査型ライダー

Lumotive 社は、ToF ライダーとして動作する、LCM 走査型ライダーをメタライダー (Meta-LidarTM) と呼 び、その第一弾として、測定距離 10~20 m を対象とした、CMOS 技術と VCSEL 技術を活用した Lumotive M30 の製品発表を行った^{†22}. これによれば、この M30 の FOV (Field of View) は、120°×90°であり、分解 能は 640×480 である。同社は、その後まもなくして、スマートフォンや拡張現実 AR (Augmented Reality) 用の短距離ライダー U30 (測定距離 10 m、消費電力 0.5 W)及び車載長距離用 L30 (測定距離 200 m)を製 品系列に加えて、LCM 走査型ライダーをシリーズ化した^{†23}. L30 の主な仕様は、小型 (<400 cm³)、広視 野 (140°×90°)、高分解能 (0.1°×0.1°)、高フレーム速度 (>20 Hz)、などである。同社の LMC 走査型ライ ダーは、送信用及び受信用に、動的かつホログラフィックに反射パターンが変えられる LCM が、それぞれ 各 1 個、計 2 個用いられている^{26)、†19}. 同社の LCM は、0.13 µm の微細な CMOS 半導体プロセスを用いて 製造されており^{†19}、量産時にはコスト低減に大きな効果を発揮するものと推察される.

同社の LCM 走査型ライダーにおいては、おそらく LCM による走査は 1 次元方向のみであり、これと直 交する方向については、線状のビーム光源を用いる一方向フラッシュ方式か、あるいは 1 次元の VCSEL ア レイを用いた 1 次元電子的走査方式との併用方式が用いられているのではないかと推定される²⁶⁾. なお同 社の最近の特許には、ライダーの薄型化及び堅牢化などの目的で、光源部及び受光部から LCM までのビー ムデリバリー用として、光導波路を用いるようにしたものや²⁷⁾、LCM のスイッチング動作時間は 25 µs 程

^{†19}G. M. Akselrod: Optics for automotive lidar: Metasurface beam steering enables solid-state, high-performance lidar, https:// www.laserfocusworld.com/print/content/14036818 (Accessed 2022.6.15).

^{†20}A. Pacala:マルチビームフラッシュライダーのしくみ, Nov. 8, 2018, chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgl clefindmkaj/https://www.opt-techno.com/opt-ouster/pdf/how-multi-beam-flash-lidar-works.pdf (Accessed 2022.6.15)

^{†21}Ouster: Ouster Investor Presentation, May 2022, https://s27.q4cdn.com/377532724/files/doc_presentation/2022/06/May-2022-Investor-Presentation-(3)_re.pdf (Accessed 2022.6.15)

^{†22}Lumotive: Lumotive unveils Meta-LidarTM platform—Industry's smallest, solid-state, all silicon, scalable 3D sensing solution, Sept. 6, 2021, https://lumotive.reportablenews.com/pr/lumotive-unveils-meta-lidar-platform-industry-s-smallest-solid-state-allsilicon-scalable-3d-sensing-solution (Accessed 2022.6.15)

^{†23}Lumotive: Products (Lumotive M30, Lumotive U30 and Lumotive L30), https://www.lumotive.com/products, (Accessed 2022.6.15)



度と高速^{†19} なので,ビームの走査はステップ状に行ない,LCM の走査が短時間停止している間にレーザー ビームを送受信して,LCM の走査方向とは直交する方向における測距データを安定に取得するようにした 走査方式²⁸⁾や,LCM 及び送受信用光学系による湾曲歪みをあらかじめ補正する機能を備えたLCM 駆動に よりビームを走査する方式²⁸⁾など,興味深い内容がいくつか含まれている.

4.3 OPA 走査型ライダー

OPA 走査型ライダーで市販品がある著名なメーカーは、現在のところ Quanergy 社のみである. 当初遠距 離まで使用可能な車載用ライダーが早期に実現されるものと期待されていたが、いまだに車載用ライダーの 市販品は実現していない. 現在ホームページ上で紹介されている、波長 905 nm を用いた、OPA 走査方式全 固体型ライダー S3-2NSI-S00 の測定距離は、反射率 10% の被写体の場合、最大 7 m、視野角 50°×4°であ り、測定距離が短く、かつ視野角が狭い²⁹⁾. 同社は、2022 年 5 月に、OPA 走査型ライダー S3 シリーズの テストにおいて、最大測定距離 250 m が実現したと発表した^{†24} が、視野角や分解能など、測定距離以外の データに関しては開示情報がなく、これだけではあとどの程度の開発期間が過ぎれば実用的な車載ライダー が実現するのか全く不透明である. 同社が開発中の車載用 OPA 走査型ライダーは、FMCW 方式ではなく ToF 方式であろうと思われる. しかし、どのようなタイプの OPA が用いられているのかは開示されておら ず、同社の OPA の詳細は不明である.

128本の平面光導波路の1次元アレイを用いた OPA では、1,350 nm~1,630 nm の広帯域な波長可変レー ザーとの組合せにより、140°×19.23°の FOV を有する2次元走査が実現している³⁰⁾. 走査ビームの広がり 角は、0.021°×0.1°である. これを用いて、反射率90%の高反射率の被写体に対して、FMCW 方式にて、最 長 100 m までの距離測定が行われた³⁰⁾. 平面光導波路タイプの1次元アレイを用いた OPA では、導波路間 の位相シフトの制御によるビーム走査は1次元の走査であるため、2次元の走査を実現するには、広帯域の 波長掃引など別の手段が必要であり、波長1,550 nm を含む SWIR 域ではシリコンフォトニクスを活用した コンパクトで安価な広帯域波長可変レーザー光源が実現する可能性が高いが、波長905 nm を含む NIR 域用 の広帯域波長可変レーザー光源の開発はかなり難しいものと思われる. 平面導波路の2次元アレイを用いた OPA では、これまでに最大 6.4°×4.4°程度の2次元走査した実現しておらず、2次元アレイを用いた平面導 波路型 OPA は実用的でないと考えられる²³⁾. また、光導波路には、光損傷が生じる懸念があるため、高出 力なレーザー光を扱うことがむすかしく、FMCW よりも高ピークパワーが必要となる ToF 方式のライダー への平面導波路型 OPA の適用は現実的でないと思われる.

4.4 FPSA²³⁾(LABS²⁴⁾) 走査型ライダー

FPSA²³(別称 LABS²⁴⁾) は, OPA よりもコンパクトであり, かつ光導波路等への要求仕様が緩やかで製 造しやすいので, FMCW 方式の全固体型ライダー用の2次元走査には, OPA よりも適しているものと考え られている.

FPSA 用のスイッチング素子には、マッハツェンダー干渉計 MZI(Mach-Zehnder Interferometer)及び MEMS などが用いられている^{23,24)}. Pointcloud 社は、MZM(Mach-Zehnder Modulator)を用いて、512(32 ×16) ピクセルを有した大規模なコヒーレント検波アレイを開発し、平均出力4mWのレーザー用いて、 FMCW 方式により距離 75 m までの3次元イメージング実験を行った³¹⁾. 将来は、デジタルカメラ同様の、 20 メガピクセル級の高精細なライダー画像が実現できる可能性があるとのこと.

これまでのところ,スイッチング素子として MZI を用いたものよりも,MEMS を用いたほうが高精細の2次元センサーが実現している²³⁾.MEMS アレイをスイッチング素子に用いた128×128(16,384)ピクセルのFPSA型ライダーでは,FOVが70°×70°で,アドレシング分解能(Addressing Resolution)0.6°×0.6°が得られている.ランダムアクセスによるイメージングが可能であり,アドレシングの応答速度はサブMHzと高速である.レーザー出力2mWを用いて,FMCW方式による距離10mまでの3次元ライダー実験が行

^{†24}Quanergy: Quanergy delivers industry -first 250 meter range for OPA-based solid state LiDAR, May 10, 2022, https:// quanergy.com/wp-content/uploads/2019/12/S3-2-Solid-State-LiDAR-for-Industrial-Applications_QPN-96-00087.pdf (Accessed 2022.6.15)



 $bnc^{23)}$.

FMCW 方式の車載ライダーを開発している企業は、Aeva 社、Mobileye 社、Aurora 社、GM 社傘下の Strobe 社など多数あるが、それらの企業がどのようなタイプのビーム走査方式を採用しているのかとか、そ れらの企業におけるスキャナーの開発の現状に関する公開情報が見当たらない. コンパクトな FMCW 方式 全固体型ライダー用の走査方式には、平面導波路を用いた OPA よりも FPSA が有望であろうと思われるが、 FPSA の量産等による安価でかつ高性能な車載用 FMCW ライダーが実現するのは、まだかなり先であり、 恐らく 2025 年以前での量産の実現は難しいのではないかと思われる.

引用文献

- 1) C. Rablau, "LIDAR—A new (self-driving) vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences," Proc. SPIE. **11143**, 111430C, 1–14 (2019).
- R. Halterman and M. Bruch, "Velodyne HDL-64E LIDAR for unmanned surface vehicle obstacle detection," Proc. SPIE. 7692, 76920D, 1-8 (2010).
- R. Shanker, A. Jonas, S. Devitt, K. Huberty, S. Flannery, W. Greene, B. Swinburne, G. Locraft, A. Wood, K. Weiss, et al., "Autonomous Cars. Self-Driving the New Auto Industry Paradigm," Morgan Stanley Blue Paper. 1–109 (2013).
- 4) E. Ackerman, "LiDAR that will make self-driving cars affordable," IEEE Spectrum, News. 14 (2015).
- F. Zhao, H. Jiang, and Z. Liu, "Recent development of automotive LiDAR technology, industry and trends," Proc. SPIE. 11179, 111794A, 1–8 (2019).
- 6) R. Roriz, J. Cabral, and T. Gomes, "Automotive LiDAR technology, A survey," IEEE Trans. Intell. Transp. Sys. 1–16 (Early access, Date of Publication: 15 June 2021) DOI: 10.1109/TITS. 2021.3086804.
- S. Royo and M. Ballesta-Garcia, "An overview of LiDAR imaging systems for autonomous vehicle," Appl. Sci. 9, (4093) 1–37 (2019).
- Y. Li and J. Ibanez-Guzman, "LiDAR for autonomous driving: The principles, challenges, and trends for automotive LiDAR and perception systems," IEEE Signal Processing Magazine. 37 (4), 50–61 (2020).
- 9) T. Yang, Y. Li, C. Zhao, D. Yao, C. Chen, L. Sun, T. Krajnik, and Z. Yan, "3D ToF LiDAR in mobile robotics: A review," arXiv:2202.11025v1 [cs. RO], [v1], https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.11025. (Accessed 2022.2.22)
- G. Kim, I. Ashraf, J. Eom, and Y. Park, "Concurrent firing light detection and ranging system for autonomous vehicles," Remote Sens. 13, (1767) 1–24 (2021).
- B. D. Padullaparthi, "Chap. 6, Automotive LiDARs," B. D. Padullaparthi, J. A. Tatum, and K. Iga (eds), VCSEL Industry: Communications and Sensing, 1st Ed., © IEEE Inc., Pub. by John Wiley & Sons, Inc. (2022).
- 12) ISO/SAE PAS 22736:2021, Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles, First Edition (2021).
- M. Anderson, "The road ahead for self-driving cars. The AV industry has had to reset expectations, as it shifts its focus to Level 4 autonomy," IEEE Spectrum, News. 8 (2020)
- H. Proff, T. Pottebaum, and P. Wolf, Autonomous Driving. Moonshot project with quantum leap from hardware to software & AI focus, Deloitte, Jan. 2019, https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/be/Documents/Deloitte_Autonomous-Driving.pdf (Accessed 2022.6.7)
- 15) M. Fitzgerald, "Automotive LiDAR: Rounding out the ADAS and autonomous driving sensor suite," Sept. 7, 2021, Strategy Analytics, p. 1~p. 14, chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://china.xilinx.com/content/dam/ xilinx/publications/press/xilinx-lidar-strategy-analytics.pdf (Accessed 2022.6.7)
- 16) D. Bonte, D. Shey, J. Hodgson, R. Whitton, and D. Povlakis, "Demystfying LiDAR: IoT and automotive applications, industries, and business models," (ABI Research, New York, USA, 2021). pp. 1–31.
- 17) A. Debray and P. Boulay, "LiDAR for automotive and industrial applications 2021, Yole Development Market & Technology Report, September 2021," https://s3.i-micronews.com/uploads/2021/09/YINTR21174-LiDAR-for-Automotive-and-Industrial-Applications-2021-Flyer.pdf (Accessed 2022.6.12)
- 18) J. M. Eichenholz, S. R. Campbell, J. E. McWhirter, M. D. Weed, and L. A. Martin, "LiDAR system with polygon mirror," US Patent Application Publication, US 2020/0284906 A1 (2020).
- 19) G. Shi, L. Zheng and X. Xiao, Laser measurement module and laser radar, WO 2020/135802 A1, July, 2, 2020. (CN 111381239 A, July, 7, 2020, in Chinese).
- 20) E. Hegblom, Y. Zhu, G. Zhao, J. Yang, K. Zhuang, B. Kesler, L. Morales, M. Peters, and J. Skidmore, "Column-addressable and matrix-addressable multi-junction VCSEL arrays for all electronic-scanning LiDAR," Proc. SPIE, **12020**, 122007, 1–9 (2022).
- 21) S. Zhao, J. Chen, and Y. Shi, "All-solid-state, beam steering via integrated optical phased array technology," Micromachines.



13, 894, 1-15 (2022).

- 22) X. Sun, L. Zhang, Q. Zhang, and W. Zhang, "Si photonics for practical LiDAR solutions," Appl. Sci. 9, 4225, 1–25 (2019).
- X. Zhang, K. Kwon, J. Henriksson, J. Luo and M. C. Wu, "A large-scale microelectromechanical-systems-based silicon photonics LiDAR," Nature. 603, 253–258 (2022).
- 24) S. J. Spector, "Review of lens-assisted beam steering methods," J. Opt. Microsystems. 2 (1), 011003, 1–16 (2022).
- 25) I. Kim, R. J. Martins, J. Jang, T. Badloe, S. Khadir, H. -Y. Jung, H. Kim, J. Kim, P. Genevet, and J. Rho, "Nanophotonics for light detection and ranging technology," Nature Nanotechnol. 16, 508–524 (2021).
- 26) G. M. Akselrod, E. E. Josberger, and M. C. Weidman, "Laser scanning system, United States Patent Application Publication," US 2018/0239021 A1 (2018).
- 27) G. M. Akselrod, "Waveguide-integrated tunable liquid crystal metasurface device," United States Patent Application Publication, US 2020/0371210 A1 (2020).
- 28) G. M. Akselrod, P. P. Iyer, and R. D. Uthoff, "Lidar systems based on tunable optical metasurfaces," United States Patent, US 11, 092, 675 B2 (2019).
- 29) Quanergy, S3-2TM solid-state LiDAR for industrial applications, datasheet, 2020, https://quanergy.com/wp-content/ uploads/2019/12/S3-2-Solid-State-LiDAR-for-Industrial-Applications_QPN-96-00087.pdf (Accessed 2022.6.16)
- 30) Y. Li, B. Chen, Q. Na, Q. Xie, M. Tao, L. Zhang, Z. Zhi, Y. Li, X, Liu, X. Luo, G. Lo, F. Gao, X. Li, and J. Song, "Wide-steering-angle high-resolution optical phase array," Photonics. Research. 9, 2511–2518 (2021).
- 31) R. Nicolaescu, C. Rogers, A. Y. Piggot, D. J. Thomson, I. E. Opris, S. A. Fortune, A. J. Compston, A. Gondarenko, F. Meng, X. Chen, and G. T. Reed, "3D imaging via silicon-photonics-based LIDAR," Proc. SPIE, **11691**, 116910G, 1–11 (2021).



鷲尾邦彦

コンサルタント、パラダイムレーザーリサーチ代表

略歴:1968 年東京大学理学系研究科物理学修士課程修了.同年,日本電気(株)入社.同社光エレクトロニクス研究所光基礎研究部長,同社レーザ装置事業部開発部長,同社制御システム事業本部主席技師長などを経て,2003年同社を定年退職.同年(有)パラダイムレーザーリサーチを設立し,取締役に就任.2020年同社解散に伴い,取締役辞任,同年,青色事業申告者としてパラダイムレーザーリサーチを開業,現在に至る.

学位:1980 年東北大学工学博士.表彰等:レーザー学会フェロー,米国 LIA フェロー, IEC 1906 賞受賞,一般財団法人光技術振興協会功労者表彰(2021).





特集 産業応用ライダー

高性能・低コストライダーの実現に向けて ~ライダー方程式に基づく考察~

亀山 俊平

三菱電機株式会社 (〒247-8501 鎌倉市大船 5-1-1)

Investigation toward the low-cost and high specification LiDAR based on the LiDAR equation

Shumpei Kameyama

Mitsubishi Electric Corporation, 5-1-1 Ofuna, Kamakura, Kanagawa 247-8501

(Received June 15, 2022; revised August 3, 2022; accepted August 15, 2022)

Investigation toward the high-performance and low-cost LiDAR is performed based on the LiDAR equation. The LiDAR methods are categorized regarding the imaging method, ranging method, and transceiver method. The performances of the methods are compared using the LiDAR equation, from the view points of measurable range, imaging rate, ranging precision, and so on.

キーワード: ライダー, ライダー方程式 **Key Words**: Lidar, Lidar equation

1. はじめに

近年,産業用途におけるライダー適用拡大が顕著であり,従来から実用されてきた測量用途に加え,工場 自動化,侵入監視,さらには自動運転向けなどで様々なライダーが開発されるようになった¹⁻⁵⁾.特に,自 動運転向けでは性能に加えコストへの要求も高く,レーザ光源などの部品性能に頼ることなく要求計測性能 の実現が必要であり,物理的に無駄のないライダー設計が求められる.この設計では,受信 SN 比 (SNR: Signal-to-Noise Ratio)を計算するライダー方程式をベースとして部品性能を決めるのが基本である.ライ ダー方程式に関しては,先人達による多くの公知文献が残されているが⁶⁻¹¹⁾,多くのパラメータが絡み合う 形となっており,要求実現や更なる高性能化に向けては,式の深い理解が重要と考えられる.ここでは,産 業用ライダーの高性能化,低コスト化を念頭に置き,この実現に向けライダー方程式ベースでの考察を行 う.本論文の内容は,レーザセンシング学会主催の産業応用セミナーで講演した既公知の内容から抜粋して まとめたものである.なお,上述の記載から,本論文では式が沢山出てくると想像される読者が多いと思わ れる.これは正しい一方,式と文章の説明では理解が進みにくいと推察し,ここでは本文中では式を一切記 載せず,全て図に模式的に記載して,物理的意味も含め理解しやすくすることを試みる.より深く理解頂く ための一助になることを期待する.

2. 産業用ライダーの高性能化とは?

産業用ライダーという文言を定義することは難しいが、1章で述べた測量などの多くの用途では、測距機能を有するイメージングライダーが用いられる¹⁻⁵⁾. イメージングライダーの模式図を図1に示す. レーザ光を対象物に照射し、散乱光を受信する. 送受信間の光の往復時間から対象物までの距離を計測するが、





図1 イメージングライダーの模式図

ビーム走査することで対象物上の多点測距を行い,対象物の3次元形状を計測するのが基本原理である.こ のライダーの性能軸は基本的に,撮像範囲,撮像距離,測距精度,撮像分解能,および撮像速度(リアルタ イム性),である.イメージングライダーにも様々な方式が存在し,撮像方式,測距方式,送受信方式,に 大別される.次章以降では,産業用としてイメージングライダーに限定した上で,このライダーにおける各 種方式を説明した後,上述の高性能化に向けライダー方程式に基づき考察を行う.

3. ライダー方式

3.1 撮像方式

撮像方式の種類を図2に示す.図では、当社開発のライダーを各方式の事例として示している.ここで言う撮像方式とは、多点測距を実現する手段としての方式を示す.2次元走査方式^{1,5)}(図2(a))は、送信ビー



図2 撮像方式の具体例((a)2次元走査方式¹⁾, (b)アレイ受信方式²⁾, (c)受信スキャンレス方式³⁾)



ムと受信視野を同軸として、2次元走査により1方向ずつ計測する方式であり、最も基本的な走査方式と言 える.一般的に構成がシンプルであり長距離撮像に向く一方、スキャナへの機械的負荷が大きく高速撮像に 不向きである.アレイ受信方式²⁾(図2(b))は、対象物に対し線状ないしは面状に送信光を照射し、散乱光 をアレイ受信機で同時受信する方式であり、一度に複数点の測距が実現できるため高速撮像に向く.一方で 1素子あたりの受光量が小さく撮像距離には制限があり、かつ受信機のアレイ化により構造が複雑化するデ メリットがある.受信スキャンレス方式^{3,4)}(図2(c))は、受信視野を広くした状態で送信ビームのみを視 野中で高速走査するものであり、ビームスキャナを小型化して高速走査、高速撮像が可能な方式である.2 次元走査方式とアレイ受信方式の中間的な方式と言える.

3.2 測距方式

測距方式の種類を図3に示す.パルス方式^{1,2,4,5)}は最も広く用いられており,パルス光の対象物までの往 復時間と光速とから測距を行うものである.CW(Continuout Waves)変調方式³⁾では,正弦波の強度変調を かけた光を対象物に照射し,散乱光を検波して得られた正弦波信号の位相を変調時と比較し,位相差から距 離を算出する.正弦波の周期ごとに同じ位相が生じるので,位相2πに相当する距離により計測可能な距離 範囲が決まる.FMCW(Frequency Modulated Continuous Waves)方式では,周波数チャープ信号で変調され た光を対象物に照射する.散乱光を検波して得られたチャープ信号と変調チャープ信号の周波数差をミキシ ングにより検出する.この周波数差から距離を計測する.一般的に,パルス方式(図3(a))は長距離測距 に向き,連続波変調方式(図3(b))は短距離・高精度測距に向くと言われているが,この理由については ライダー方程式を用いて後述する.FMCW方式(図3(c))は基本的に,チャープ周波数範囲の逆数で決ま る時間幅を持つパルスで送受するのと等価であるが,正確に記載すると計測距離に関しては後述する検波方 式に依存する.FMCW方式に関しては後述するコヒーレント方式が用いられることが多い⁶⁾.



3.3 送受信方式

送受信方式の模式図を図4に示す.直接検波方式¹⁻⁵⁾(図4(a))は変調された光を送信し,散乱光を強度 検波する方式である.コヒーレント方式¹²⁾(図4(b))は,基準光源と分配器が必要であり,一方を送信光と して変調後に対象物へ送信する.他方をローカル光として散乱光とコヒーレント検波(ホモダインないしは ヘテロダイン検波)して信号を検出する.直接検波方式は構成がシンプルで部品点数も少なく低コスト化に





図4 送受信方式模式図((a) 直接検波方式,(b) コヒーレント方式)

向く反面,受信感度が取りにくいのがデメリットである.一方,コヒーレント方式は受信感度が高く,かつ ドップラー周波数検出による速度計測も実現でき,さらに原理的に背景光の影響を受けにくいメリットがあ る.反面,散乱光のうち検出できるのはローカル光と結合する成分だけであり,(i)大気揺らぎなどの光学 収差により受信波面がくずれると検出光量が低下,(ii)光の干渉を利用しているため検出光量が不安定, などのデメリットが存在する.このため,光学部品を低収差化するのが必須となるのに加え,検出光量を安 定化させるための信号積算などの工夫が必要となるケースが多い.また,図4からも分かる通り部品点数も 多く低コスト化のハードルが高い.これらのトレードオフについても、ライダー方程式に基づき後述する.

4. ライダー方程式

ここでは、本論文の主題であるライダー方程式について説明するが、本文中に式を羅列するスタイルは読 者の理解を妨げると考え、試みとして図を使って式を説明したい.一般的なライダー方程式を図5に模式的 に示す.ライダー方程式は一般的に、受信信号の SNR (Signal to Noise Rario:信号対電力雑音比)を計算す るものである⁶⁾.特に雑音項(分母)において、信号ショット雑音、ローカル光ショット雑音,背景光 ショット雑音,暗電流ショット雑音,電気回路熱雑音と、多くの成分が存在するのが特徴であり、これらを 網羅的に考慮することが設計計算において必要である.また、ショット雑音限界が存在するのもライダー方 程式特有であり、受信光パワー(図中の PR)における SNR の理論限界が存在する.図から分かるように、



図5 ライダー方程式の説明図





図6 ライダー方程式に関わる関連式の説明図

ライダー方程式には多くのパラメータが存在するものの四則演算で表現されており難しいものではない.ただし,このライダー方程式には多くの関連式があり,これら関連式においてさらに多くのパラメータが存在する.これらの式,パラメータを一覧で示したものを図6に示す.これらの式は主に,装置パラメータの制限要因となっており,例えば受信光パワーを大きくしたければ受信開口径(図中のD)を大きくしたいが,光学系の視野の要求があれば受信開口径が制限を受けるジレンマが存在する.またコヒーレント方式では,受信光(点波源の集合と近似される散乱体の各波源からの球面波)とローカル光(ガウシアンビーム)の結合効率による検出信号電力の低下が存在し,この低下を考慮する必要がある.さらに大気構造定数(図中の C_n²)による受信光の波面収差の影響も考慮が必要となる.次章で説明する各方式のメリット・デメリットはこれらのジレンマによるものである.

5. 各方式のメリット・デメリットに関するライダー方程式からの考察

5.1 撮像方式

ライダー方程式に基づき、各撮像方式のメリット・デメリットを考察する。各方式の考察に関し、式を含め図7から図10に示す。各図には、各方式の特徴を顕著に示す代表的な撮像結果をあわせて掲載している。 2次元走査方式は受光パワーが1素子に集中できるため効率が良く長距離撮像に向くが、1点ずつしか計測 しないため撮像レートが遅い(図7).過去の一例では、128×128 画素での撮像レートは2Hz に制限されて いる⁵⁾.アレイ受信方式は一瞬で多画素の撮像が可能であり高速撮像に適しており、256×256 画素をレート 30 Hz で撮像した事例も報告されている²⁾.一方、受光パワーがN 個の素子に分割されるので長距離撮像に は不利であり、かつ、長距離撮像のため受信開口を大きくすると光学系のF 値の制限などにより受信視野 が限定される(図8).例えば上述の高速撮像事例(撮像レート 30 Hz)では、視野は4度に限定されてい る.また、受信系のアレイ化により構成が複雑で、歩留まりの課題を抱えるとともにコスト面でのデメリッ トが出やすい、アレイの素子数が増えれば全素子良品のチップを得る難易度は高くなるし、集積回路やパッ ケージングにおける配線不良も発生しやすい、受信スキャンレス方式は、大きい受光素子を用いることで広 い視野を確保でき、送信ビームを小さいスキャナ(主に MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)で高速





図7 ライダー方程式に基づく考察(2次元走査方式)と代表撮像例⁵⁾



図8 ライダー方程式に基づく考察(アレイ受信方式)と代表撮像例²⁾



図9 ライダー方程式に基づく考察(受信スキャンレス方式)と代表撮像例³⁾

スキャンし、高撮像レートと単素子でのシンプルな構成を両立できる(図9). ライン撮像ではあるが、この方式におる 0.9 ms/line の高速撮像が報告されている³⁾. ただし図 10 に示すように受光素子が大きいことにより浮遊容量(図中 C_P)が大きく、これに伴いノイズレベル上昇が存在する. この上昇はインダクタを用いて TIA を共振型とすることで回避できるが、回避できるのが単一周波数であるため測距方式が CW 変調方式に限定される. 後述するとおり CW 変調方式は長距離測距が難しいとの課題が残る. この課題を解決するパルス型の受信スキャンレス方式⁵⁾も考案しており、パルス・CW 変調の中間的な性能となっている.





5.2 変調方式

変調方式の撮像距離,測距精度に関するトレードオフを図 11 に示す.ライダー方程式において、基本的 に信号成分は受光パワーの自乗に比例し、雑音成分は受信帯域幅の一乗に比例する.同じ平均送信パワーで 考えた場合,パルス方式の高ピークのメリットが受信帯域幅を広くとることのデメリットに勝ることとな り、長距離撮像においてはパルス方式が優位である(正確に記載すると、直接検波方式の場合に上記は当て はまるが、コヒーレント方式の場合は信号成分が受光パワーの一乗に比例となるので FMCW コヒーレント 方式は同じ変調帯域を持つパルス方式と同じ SNR となる).一方で、測距精度に関しては、パルス方式では



図11 ライダー方程式に基づく考察(変調方式トレードオフ)



パルス幅の逆数で基本的に精度が制限されるのに対し, CW 変調方式は SNR を高くとるほど原理的に精度 改善させるので, 短距離・高精度測距においては後者が優位と言われている.

5.3 送受信方式

送受信方式に関しては、コヒーレント方式に主眼を置きメリット・デメリットを考察する. コヒーレント 方式のメリットは図 12 に示すとおり、ローカル光パワーを大きく(筆者の経験的には5 mW 前後)するこ とでショット雑音限界の実現が比較的容易であり受信感度が高いことにある. また図 13 に示すとおり等価 的に超狭帯域光フィルタを実現しており、背景光の影響をほぼ受けない. これは、コヒーレント方式がロー カル光と干渉する信号だけを抜き出していることに起因している. さらに図示していないが、この干渉性の 利用によりドップラー周波数シフトを利用でき、対象物の速度を計測できる多機能性もある. しかしデメ リットも有しており、これらが図 14 から図 16 に示されている. まず図 14 に示すように、送受信とも回折







図 13 コヒーレント方式における背景光の影響に関する説明







図 15 コヒーレント方式における大気揺らぎの影響に関する説明

限界のビーム品質が求められておりビーム幅が狭い.これは等価的に,送信がほぼ線状のビームであるにも かかわらず受信視野が非常に狭いことを意味している.したがって,光軸ずれに非常に敏感である.また高 速スキャンすると送受信間の光軸角度差から受信効率が低下する.例えばイメージングでなく風計測ライ ダーのケースであるが,20度/secのスキャン速度において距離10km前後における受信効率が生じること が実験的にも実証されている¹³⁾.イメージングライダーにおけるスキャン速度はさらに高速であることが 多く,上記光軸角度差の影響はより顕著に生じると考えられる.さらに,レーザ光源に求める回折限界レベ ルのビーム品質がコスト上昇要因となる点も念頭に置く必要もある.また図15に示すように大気揺らぎの 影響を受けやすく,この影響が距離に対し積分的な影響で効いてくる.上記にてショット雑音限界の実現に より受信感度が高いとのメリットを示したが,結果的にはこの大気揺らぎの影響とのトレードオフとなる. また図16に示すように,スペックル散乱の影響により検出する信号強度が大きく変動する点も念頭に置く 必要がある.コヒーレント方式における信号強度の確率密度分布は、1パルスに対する受信の場合は逆指数 関数であるため,原理的には検出強度はゼロとなる確率が最も高い(図16右下の確率密度分布の模式図参 照).





図 16 コヒーレント方式におけるスペックル効果の影響に関する説明

6. 各方式の比較まとめと今後の高性能化の可能性

5章に示したメリット・デメリットをトレードオフ表としてまとめたものを表1に示す.全ての方式において過去の多大な努力のもと,優れた成果が報告されてきた.筆者としては極力客観的な視点からこの表を まとめたが,各方式の開発者からすれば別の主張もあるだろう.この比較はあくまで,筆者の主観に基づい ている点に留意されたい.どの方式にもメリット・デメリットがあり,万能な方式は存在しない.適用する 用途ごとでの要求性能に加え,要求コストにより最適方式が決まることとなる.

ライダー方式は既に多くが提案されており且つ、その性能はあくまでライダー方程式の中で決まるため、 新しい方式により性能が大きく向上することを想像するのは難しい。例外としては2例あげておく。一つ は、シリコンベースのフォトンカウンティングである。これまではシリコンの近赤外での光子検出確率が低 いという課題があったが、この値が22%まで向上しており、この素子を用いたライダー性能検証も始まっ ている¹⁴⁾. もう一つは、受信信号を増幅する方式が最近報告されており¹⁵⁾、これも注目に値する。受信光 を増幅する際の過剰雑音の影響を吟味する必要があるが、受信光パワーで決まるショット雑音限界以上の性 能を実現する可能性を有している.

Method			Imaging	Imaging	Ranging	Interference	Signal	Influence of	Influence of
Transmit /Receive	Modulation	Imaging	range	rate	precision	between sensors	stability	background light	refractive turbulence
Direct detection	Pulse	2D scanning	Long	Low	Middle	Middle	High	Low	Low
		Array receiving	Short	High	Middle	Middle	High	Low	Low
		Scanless receiver	Middle	High (Middle)	Middle	Middle	High	Large	Low
	cw	Scanless receiver	Short	High (Middle)	High	Middle	High	Middle	Low
Coherent	Pulse	2D scanning	Middle	Low	Middle	Low	Low	Extremely low	Middle
	FMCW	2D scanning	Middle	Low	Middle	Low	Low	Extremely low	Middle

表1 方式トレードオフ表(赤字が各方式にてメリットとなる項目)



7. まとめ

産業用ライダーとしてイメージングライダーの高性能化,低コスト化を念頭に置き,この実現に向けライ ダー方程式ベースでの考察を行った.5章で述べたとおり各方式にメリット・デメリットがあり万能な方式 はなく,用途ごとの要求性能,要求コストにあわせ方式選定ならびに設計計算することが重要である.本論 文の内容が,今後のライダー性能向上と普及に資することを期待する.

引用文献

- 1) M. Imaki, H. Ochimizu, H. Tsuji, S. Kameyama, T. Saito, S. Ishibashi, and H. Yoshida, "Underwater three-dimensional imaging laser sensor with 120-deg wide-scanning angle using the combination of a dome lens and coaxial optics," Optical Engineering. **56** (3), 031212 (2016).
- 2) S. Kameyama, A. Hirai, M. Imaki, N. Kotake, H. Tsuji, Y. Nishino, Y. Ito, M. Takabayashi, Y. Tamagawa, M. Nakaji, E. Ishimura, and Y. Hirano, "Demonstration on range imaging of 256 × 256 pixels and 30 frames per second using short wavelength infrared pulsed time-of-flight laser sensor with linear array receiver," Optical Engineering. 56 (3), 031214 (2016).
- 3) M. Imaki, S. Kameyama, E. Ishimura, M. Nakaji, H. Yoshinaga, and Y. Hirano, "Line scanning time-of-flight laser sensor for intelligent transport systems, combining wide field-of-view optics of 30 deg, high scanning speed of 0.9 ms/line, and simple sensor configuration," Optical Engineering. 56 (3), 031205 (2016).
- 4) H. Tsuji, M. Imaki, N. Kotake, A. Hirai, M. Nakaji, and S. Kameyama, "Range imaging pulsed laser sensor with two-dimensional scanning of transmitted beam and scanless receiver using high-aspect avalanche photodiode array for eye-safe wavelength," Optical Engineering. 56 (3), 031216 (2016).
- 5) S. Kameyama, M. Imaki, Y. Tamagawa, Y. Akino, A. Hirai, E. Ishimura, and Y. Hirano, "3D imaging LADAR with linear array devices: laser, detector and ROIC," Proc. of SPIE, 7382, 102–109 (2009).
- K. W. Broome, A. M. Carstens, J. R. Hudson, and K. L. Yates, "Demonstration of advanced solid state ladar (DASSL)," Proc. SPIE, 3065, 148–157 (1997).
- 7) O. K. Steinvall and T. Carlsson, "Three-dimensional laser radar modeling," Proc. of SPIE. 4377, 23-34 (2001).
- 8) R. H. Rasshofer, M. Spies, and H. Spies, "Influences of weather phenomena on automotive laser radar systems," Advances in Radio Science. 9, 49–60 (2010).
- 9) R. G. Frehlich and M. J. Kavaya, "Coherent laser radar performance for general atmospheric refractive turbulence," Applied Optics. **30** (36), 5325–5352 (1991).
- M. J. Kavaya and P. J. Suni, "Continuous wave coherent laser radar: calculation of measurement location and volume," Applied Optics. 30, 2634–2642 (1991).
- 11) S. Kameyama, T. Ando, K. Asaka, and Y. Hirano, "Semianalytic pulsed coherent laser radar equation for coaxial and apertured systems using nearest Gaussian approximation," Applied Optics. **49** (27), 5169–5174 (2010).
- 12) H. Tsuchida, "Frequency-modulated continuous-wave light detection and ranging with sinusoidal frequency modulation and beat phase detection," Electronics Letters. **55** (24), 1297–1299 (2019).
- 13) Y. Ito, M. Imaki, T. Sakimura, T. Yanagisawa, and S. Kameyama, "Enhancement of heterodyne-detection efficiency in wind sensing coherent Doppler lidar using active alignment of receiving beam for the recovery from misalignment and the lag-angle compensation," Proc. of Coherent Laser Radar Conference (2022).
- 14) O. Kumagai, J. Ohmachi, M. Matsumura, S. Yagi, K. Tayu, K. Amagawa, T. Matsukawa, O. Ozawa, D. Hirono, Y. Shinozuka, R. Homma, K. Mahara, T. Ohyama, Y. Morita, S. Shimada, T. Ueno, A. Matsumoto, Y. Otake, T. Wakano, T. Izawa, "A 189 × 600 back-illuminated stacked SPAD direct time-of-flight depth sensor for automotive LiDAR systems," Proc. of IEEE International Solid-State Circuits Conference, 64, 110–112 (2021).
- 15) D. Inoue, T. Ichikawa, and H. Matsubara, "LiDAR system with a coin-sized sensor head and an optical preamplifier capable of detection at 200 m," Journal of Lightwave Technology. **39** (18), 5715–5721 (2021).

亀山俊平

1995 年三菱電機株式会社入社,以降,風計測コヒーレントライダー,差分吸収ライダー,イメージングライダーなどの開発に従事,2011 年千葉大学にて博士取得.2017 年 技術経営・イノベーション賞,2021 年 RTCA Significant Contibutor Award 各受賞,IEEE, Optica,レーザセンシング学会,各会員.





特集 産業応用ライダー

LIDAR を用いたスマートモニタリングと, 自律モビリティへの展開

新熊 亮一

芝浦工業大学工学部情報工学科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

Smart monitoring using LiDAR and further development for autonomous mobility

Ryoichi Shinkuma

Computer Science and Engineering, Faculty of Engineering, 3–7–5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo, 135–8548, Japan

(Received June 11, 2022; revised August 7, 2022; accepted August 23, 2022)

The authors have developed a smart monitoring system that enables reducing risk of traffic accident. In particular, this article presents the deployment of a sensor network composed of multiple LiDAR units, which uses machine learning for adaptive transmission control for LiDAR data against the limitation of bandwidth. As an application of the sensor network, this article also presents the Digital Twin platform for micro mobility, which improves the safety and the efficiency of self-driving for micro-mobility vehicles by providing the vehicles the spatial information produced from the LiDAR data.

キーワード:LIDAR, スマートモニタリング, 自律モビリティ **Key Words**: LiDAR, smart monitoring, autonomous mobility

1. はじめに

人々の移動は交通機関の利用や種々の消費行動を生むため、いわば経済活性化の源である. 国内外で、配 車サービスや、カー・バイクシェアリング、自動運転タクシーといった MaaS (Mobility as a Service) に代 表されるように、モビリティの革新が求められている. 従来の徒歩、電車、自動車を中心としたモビリティ では、通勤ラッシュや、渋滞、移動弱者、駅前への集中といった社会問題があった¹⁾. 国内外において、各 種電動スクーターに代表されるマイクロモビリティへのニーズが強まっている. さらには、マイクロモビリ ティの自動運転化技術は、運搬ロボットにも応用できるため、そのニーズが高まっている. マイクロモビリ ティの世界市場は 2021 年に 481.1 億米ドルであったのが、2030 年までに 1,980.3 億米ドルを超えると予想さ れている²⁾. 我が国でも NTT ドコモの電動自転車や LUUP の電動キックスクーターといったマイクロモビ リティサービスが本格化している. 一方、自動運転の世界市場は 2021 年に 944.3 億米ドルだったのが、 2030 年までに約 18084.4 億米ドルに達すると予測されている³⁾. 我が国でも羽田イノベーションシティの自 動運転バスや SEQSENSE の自動警備ロボットなど自律走行が日常なりつつある.

しかしながら,移動により事故や,犯罪,ウイルス感染といったリスクも生じる.我が国では,人口減か つ少子化であるにも関わらず9歳以下の行方不明者数は年々増加している(平成 30 年 1,216 人)⁴⁾.小学生 歩行中の平成 25~29 年の交通事故死傷者数は 99,040 人(死者数 168 人)であった.また,高齢運転者によ る死亡事故が社会問題となっており,子供が巻き込まれることもある.一方,新型コロナウイルス(COVID-19)の感染拡大により,我が国への渡航者が激減し,インバウンド(外国からの訪問)に依存した経済の大



きなリスクが露呈した.以上のとおり,移動は経済活性化の源であるが,一方で,移動する人々をいかにして事故,犯罪,ウイルス感染のリスクから守るかが大きな社会課題となっている.

2. スマートモニタリング

2.1 目 的

1. であげた社会課題のソリューションとして、著者はスマートモニタリングの研究開発ならびに社会実 装を進めている⁵⁾.図1に、スマートモニタリングを実現するセンサネットワークシステムを示す.このセ ンサネットワークシステムには、移動する人々を見守る「目」として、三次元イメージセンサ(3D センサ) である LIDAR(Light Detection and Ranging)が用いられる.カメラも同様であるが、1 台では遮蔽により多 数の死角ができてしまう.そこで、複数の LIDAR を用いることで死角をなくす.さらに、台数を5 台 10 台 と増やすことで、LIDAR が取得する点密度を向上し、物体の検出精度を向上する⁶⁾.

しかし、イメージセンサのデータサイズが膨大である、という課題がある。例えば、1フレームあたり1 Mバイト、30フレーム/秒で、10台のイメージセンサが、無線接続されているエッジコンピュータにイ メージセンサデータを送信したとすると、その容量は2.4 Gbpsとなる。5GやIEEE802.11axといった昨今の 無線標準規格では収容できる容量であるが、イメージセンサからエッジコンピュータへの通信は上り方向で 衝突が生じやすいこと、複数のシステムが2.4 Gbpsで常時通信するほど通信容量は十分でないことから、 限られた帯域でイメージセンサデータを送受信できる必要がある。なお、カメラが取得したイメージセンサ データは個人の顔や車のナンバープレートの情報を含むため、かなりプライバシーに注意が必要である。 LIDAR(Light Detection and Ranging)で取得された3次元イメージセンサデータの形式は点群(Point Cloud) であるため、顔やナンバープレートの情報は含まない。

著者の研究は、独自の機械学習による「データの目利き」技術により、厳しい通信帯域制限下での高精度 の検出を実現した⁷⁾.機械学習による「データの目利き」技術とは、歩行者や車両の検出に機械学習を用 い、機械学習により生成されたモデルから入力データの重要度をスコアとして抽出し、そのスコアを通信に おける優先制御に用いる技術である。一例として、使用可能な通信帯域が 1/20 まで制限された状況でも、 車両の検出精度を維持できたという結果が得られている。この技術により、重要なデータに通信帯域やプラ イバシー保護の処理を優先的に割り当てることができる。著者は、以上で述べたイメージセンサネットワー クシステムの研究開発プロジェクトを立ち上げ、その適用先のモデルとして京都などでの実証実験を実施 し、社会実装を推進している。



図1 スマートモニタリングのためのセンサネットワ システム

2.2 低レート高精度イメージセンサネットワーク技術

LIDAR により取得されるイメージセンサデータのデータサイズが大きいため,通信帯域を逼迫する問題 がある.これに対し,機械学習によるデータの目利きを行ない,重要度に基づいた優先制御により限られた 通信帯域で,人や車両の検出精度の改善に大きく寄与するデータを送ることができる技術を確立した.本技 術は,デバイス-エッジ間のイメージセンサデータ通信制御技術とエッジにおけるイメージセンサデータ高 速処理技術という2つの要素技術で構成される.



1) デバイス-エッジ間のイメージセンサデータ通信制御技術

実装したシステムの構成を図2に示す. LIDAR をセンサとして備えたイメージセンサデバイス複数台と エッジコンピュータが無線通信で接続されている. 機械学習によるデータの目利きにより, 機械学習のモデ ルから各々のデータの重要度をスコアとして抽出する. そのスコアに基づいてイメージセンサデバイスの送 信部を制御する. 具体的には, 通信帯域よりも送信レートが高い場合, スコアの低いデータは送信しない, あるいは, スコアの高低に応じた圧縮方式を用いる, といった制御を行う. これにより, 限られた通信帯域 でも重要度の高いデータがエッジコンピュータに受信される. 図2の評価部(Evaluator)が実空間の特徴を 領域ごとに学習し選択部(Selector)が, 検出部(Detector)にとって重要度の高いデータを選定すること で, 例えば, 1 M バイト(=8 Mbps), 30 フレーム/秒, デバイス数 10 でもオーバーフローしない通信を実 機により達成した⁸⁾.



2) エッジにおけるイメージセンサデータ高速処理技術

エッジコンピュータでリアルタイムに受信されたイメージセンサのデータを集約し,歩行者や車両をエッ ジコンピュータの限られた計算性能でも高速に検出できる処理技術を確立した.図2のエッジサーバ (Edge server)を実装し,KITTIデータを用いた評価により,対象空間全体に対して精度90.6%,処理時間700.1秒 を達成し,特に歩行者と車両の出現頻度が多い空間については処理時間371.6 ミリ秒を達成した⁹⁾.

2.3 人や車両検知するイメージセンサネットワークシステムの実験

2.1 で述べた要素技術を備えたイメージセンサネットワークシステムを構築するための仕様策定とプロト タイプ実装を行なった. 複数の自治体間のデータ共有・相互活用を想定し,京都市内の交差点や駐車場など 10 地点に LIDAR を設置し半年以上のデータを取得した¹⁰⁾.図3に,京都市百万遍交差点(左京区)で取得 した LIDAR データに深層学習を用いた車両検出の例を示す.ある程度の検出に成功しているが,LIDAR を 1 台しか用いていないため,死角により車両が一時的に消失することがあった.したがって,上記のとお り,複数の LIDAR により死角をなくす必要がある.



図 3 LIDAR データに機械学習を用いた車両検出の例(左から右へフレームが進んでいる)



3. 自律モビリティへの展開

3.1 目 的

2. で述べたスマートモニタリングのシステムは従来の自動車や歩行者の見守りに有効であるが,著者は これをさらに自動運転技術による自律モビリティへと展開している.

未来都市に向けて自律移動マシンによる運輸旅客業の革新が期待されている.しかし,自律マイクロモビ リティには大きな課題がある.一定エリアに,より多くの車両(ロボット含む)が混在するほど,人や,静 止オブジェクト,他の車両に衝突しないよう車載のセンサユニットと計算ユニットにもより高性能なものが 求められる.しかし,これらのユニットが高性能であるほど,車載一台あたりの費用が高額になり普及の障 壁となってしまう.また,自律マイクロモビリティのセンサ位置は地上1メートル以下であることが多い. 建物や大型車両でなく,例えば,周辺の歩行者がセンサを遮蔽してしまい,多くの死角が生じ事故のリスク が増大してしまう.また,センサや AI をターゲットとしたサイバー攻撃により広範囲の災害が引き起こさ れる恐れがある.

そこで、著者は、2. で述べたスマートモニタリングのシステムを発展させ、デジタルツインをリアルタイ ムに提供するシステムの研究開発を進めている。デジタルツインとは実空間のデジタルコピーであり、ここ では、特に自動運転に必要な 3D イメージデータを示す. LIDAR を備えたイメージセンサを多数配置し固定 無線により相互接続することで、多重複合 LIDAR センサネットワークを構成する. 加えて、クラウドコン ピュータは 3D イメージのデータ形式である点群向けの深層学習のモデルを学習し、エッジコンピュータは 多数のセンサから受信した 3D イメージをリアルタイム統合し、その学習モデルを適用し車両や歩行者と いった移動オブジェクトや静止オブジェクトを検出する. そして、3D イメージと検出結果を統合したデジ タルツインを移動無線経由で自律移動マシンに配信する. センサの死角が自律移動マシンの事故や効率低下 の原因になるが、このデジタルツインを用いた予測的制御により安全性効率性を高められる. また、サイ バー攻撃などにより車載のセンサや AI が使用不可になった場合には、移動無線経由のデジタルツインのみ を頼りに安全な自律移動を実現する.

3.2 ネットワークによるセンサ情報の二重化

車載のセンサが死角やサイバー攻撃により機能を果たしていない場合に、周辺に固定設置された LIDAR が取得するデータをリアルタイムにネットワーク経由で車両に提供する.このとき、自律移動を維持するた めには以下 2 つの課題がある.

まず,自律移動マシンが自身のセンサでは情報を取得せずに,移動通信経由で受信したデジタルツインの みから自己位置を特定できる必要がある.車両は自身のセンサに基づいて自己位置推定を行うことができ る.一方,多重複合センサネットワークは当該車両の位置を検出することができる.自己位置と検出された 位置とをマッピングしておくことで,センサがオフになっても自己位置を継続維持する手法を考案した.

また,自律移動マシンが自身のセンサでは情報を取得せずに,移動通信経由で受信したデジタルツインの みを用いて障害物を避けながら移動できる必要がある.本来,車両は自身のセンサにより環境認知し移動を 制御できるので,このセンサのデータを移動通信経由で受信したデータに仮想的に置き換える機能を追加実 装した.これにより,センサがオフになっても車両が移動通信経由で受信したデータのみで障害物を避けな がら移動可能な手法を考案した¹¹⁾.

図4にシステム構成を示す.周辺に固定設置された 3D センサのデータを複数台分集約し,自律モビリ ティ車両に送信し,車載の 3D センサと二重化するシステムを開発した.センサ異常停止時には固定設置さ れた方のセンサのデータで補完し,自律走行を持続する.

3.3 実証実験

多重複合 LIDAR センサネットワークが提供するデジタルツインの有効性を示すため、自律移動マシンが 実際にセンサレスでも自律走行可能であることを示す FS(Feasibility Study)を実施する. 芝浦工業大学で 開発した自律移動シニアカーのプロトタイプ¹²⁾を利用する. 3.2 で述べたシステムを用い, i)自己位置がわ かっている状態からセンサをオフにしデジタルツインによる安全な停止,ならびに ii)一定時間センサをオ





図4 ネットワークによるセンサの二重化システムの構成

フにしデジタルツインにより自己位置を維持しながらの移動について,実証実験を行った.i)では,安全 停止できる場所まで走行を維持する必要があるため停止までの時間の長さと,事故を発生させないための走 行時の位置ずれが評価指標となる.目標値としてそれぞれ 50 cm を設定した.ii)では,一時的にセンサが オフになり一定時間後に復旧する.センサオフの状態を継続できた時間の長さと走行時の位置ずれが評価指 標となる.50 cm を設定した.

正常時と異常停止時の移動軌跡をマーカーで記録し誤差を測定した.実験は芝浦工業大学大宮校舎(埼玉 県さいたま市見沼区)の2号館で実施した.本実験では、無線通信のボトルネックの問題解決は対象外であ るため、固定設置した LIDAR からの 3D データを無線通信でリアルタイムに送受信することは行わず、代 わりにエッジサーバにあらかじめ 3D データをキャッシュし、再生タイミングを実際の移動と同期させた.

図5は自動運転ソフトウェアで示されたシニアカーの移動軌跡である.図6は、2022年1月22日に実施



図5 シニアカーの移動軌跡





した実験の結果である. 誤差 50 cm 以内におさまった. また, 図 7 は 2022 年 2 月 23 日に実施した 2 回の実 験の移動軌跡である. その実験の誤差を図 8 に示す. 図 8 の横軸は誤差, 縦軸は DTW (Dynamic Time Warp) というアルゴリズムで算出した軌道の差である. DTW は異なる 2 つの時系列信号間の類似度を定量 化するのに有用である. 2 回の実験の誤差は, 横軸 0.2, 0.4, つまり 20 cm, 40 cm のときに相当する. この ように誤差 50 cm 以内を達成できた.



4. 社会実装と今後の展開

提案する LIDAR センサネットワークを商業・住宅エリアに配備し、一軒の住宅・店舗から町まるごとま でをスケーラブルに実空間をカバーする.1次の価値として、一つの施設における安全移動や犯罪抑止効果 が期待できる。例えば、ショッピングモール、テーマパーク、駐車場、駅など大型施設や交通施設に提案 ネットワークが配備されることで、安全移動・安全運転の促進やセンサの存在自体による犯罪抑止効果が期 待できる。2次の価値としてイメージデータそのものあるいはその集約データを、例えば、Uber や MONET Technologies といった次世代モビリティサービス MaaS 事業者や、宅配ドローン事業者に提供できる。3次 の価値はプラットホームの運営者あるいはユーザ自身がデータを分析し、実空間情報を生み出すというもの である。例えば、車や人の空き・混雑状況は MaaS の需要予測に活用でき、事故や自然災害による被害(電



柱転倒, 冠水など)といった異常検知は MaaS の安全で効率的な運用に必要な情報である.4次の価値は, Apple や, Amazon, LINE, 楽天のような, 複数業種の事業者に対し実空間情報を活用した多様なサービス 実現可能なプラットホームを提供するものである.

スマートモニタリングのような初期の収益化が難しく公共的な事業は、大学によるリードと産学官連携に より長期的なビジョンを持って取り組むべき事業領域であると言える.また、ドローンによる空の産業革命 が起きると予想される 10~20 年後にも、スマートモニタリングに「空」という選択肢が加わることで、さ らなる発展が期待できる.イメージセンサの市場は、自動運転車への応用などにより、2025 年には 28.0B ドルに拡大すると予想されており¹³⁾、加えて LIDAR の低価格化がさらなる追い風になると予想される.

自動運転車や無人航空機といった自律移動マシンへの適用には高い信頼性が求められるため段階的に進める.

5. おわりに

本稿では、LIDAR を用いたスマートモニタリングならびに自律モビリティへの展開について論じた.1) データ取得,2) 情報二重化,3) 異常に対する耐性の3つの柱があり,本稿の2.で1) について,3.で 2) と3) について述べた.ただし,3) については,本稿で述べた実証実験では,サイバー攻撃などによる センサ異常停止のみを対象としていたが,サイバー攻撃によってセンサが誤動作したり暴走したりといった こともあり得る.自動運転車や無人航空機といった自律移動マシンはカメラや LIDAR といったイメージセ ンサやレーダーなどを搭載し,それらにより自身の位置や周辺のオブジェクトを認識し,自身の移動を制御 する.しかし,センサや AI に対するサイバー攻撃が増えており,センサや AI の異常により自動運転車や 無人航空機の制御に異常が発生し,広範囲の災害につながる恐れがある.これに対し,スマートモニタリン グにより得られたデータを実空間に重ね「二重化」し,ロバスト性を高める必要がある.このような二重化 が,今後成長が予想される自律移動マシンを活用した運輸・旅客サービスの安心安全と正確性を保証し,そ れらのサービスの価値を保証する役割を今後長期にわたり担っていく.

謝 辞

本研究はJST さきがけJPMJPR1854, JST SBIR フェーズ1支援JPMJST2151, ならびにJSPS 科研費 21H03427の成果である.本研究成果の一部は,国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究(採択番号 06401)により得られた.

引用文献

- 1) 内閣府自動走行システム推進委員会, https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/iinkai/jidousoukou_6/6_js_siryo6-4-2_1.pdf (p.2) (Accessed 2022.8.7)
- 2) Micro-mobility Market, https://www.precedenceresearch.com/micro-mobility-market (Accessed 2022.8.7)
- 3) Autonomous Vehicle Market, https://www.precedenceresearch.com/autonomous-vehicle-market (Accessed 2022.8.7)
- 4) 平成 30 年における行方不明者の状況について, https://www.npa.go.jp/safetylife/seianki/fumei/H30yukuehumeisha_ zuhyou.pdf (Accessed 2022.8.7)
- 5) 新熊亮一, "LIDAR を用いた 3 次元センサネットワークによるスマートモニタリングの社会実装,"月刊車載テク ノロジー 5 月号. 技術情報協会, (2022).
- 6) C. Li, R. Shinkuma, T. Sato, and E. Oki, "Real-Time Data Selection and Merging for 3D-Image Sensing Network With Multiple Sensors," IEEE Sensors Journal. **21** (19), 22058–22076 (2021).
- 7) M. Oka, R. Shinkuma, T. Sato, E. Oki, T. Iwai, K. Nihei and K. Satoda, "Spatial feature-based prioritization for transmission of point cloud data in 3D-image sensor networks," IEEE Sensors Journal. **21** (20), 23145–23161 (2021).
- K. Akiyama, R. Shinkuma, J. Shiomi, "Real-time adaptive data filtering with multiple sensors for indoor monitoring," NOMS 2022 Demos Session (2022).
- 9) R. Otsu, R. Shinkuma, T. Sato, E. Oki, D. Hasegawa and T. Furuya, "Spatial-importance based computation scheme for realtime object detection from 3D sensor data," IEEE Access, 10, 5672–5680 (2022).
- 10) LIDAR による 3 次元データ取得実験, https://sites.google.com/view/lidar-ku/%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%A0
- 11) K. Akiyama, R. Shinkuma, C. Yamamoto, M. Saito, T. Ito, K. Nihei, and T. Iwai, "Edge computing system with multi-LIDAR sensor network for robustness of autonomous personal-mobility," IEEE ICDCS Workshop, Wi SARN 2022 (2022).



- 12) M. Z. Azmi, Y. Nakayama, R. Toya, M. Shikahama, and T. Ito, Modular Controller Box for Autonomous Personal Mobility (2019).
- 13) Markets and markets, "Image Sensor Market with COVID-19 Impact Analysis by Technology (CMOS Image Sensors)," Processing Technique (3D Image Sensors), Spectrum, Array Type, Resolutions End User (Automotive, Consumer Electronics), and Geography Global Forecast to 2025, https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/Image-Sensor-Semicon-ductor-Market-601.html (2022).



新熊亮一

2003年大阪大学大学院工学研究科にて博士(工学)を取得,2003~2011年京都大学助教(2007助手から職名変更),2011~2021年同准教授を経,2021年4月より芝浦工業大学情報工学科教授.2008~2009年米国WINLAB客員研究員,2018~2022年科学技術振興機構さきがけ研究員,2021年~(株)KDDI総合研究所招聘研究員.2013年頃から技術顧問を務める民間企業3社,自ら設立した大学発スタートアップにより研究成果の社会実装を推進.2016年電気通信普及財団テレコムシステム技術賞,電子情報通信学会より,2019年に通信ソサイエティ論文賞,2022年に論文賞を受賞.米国 IEEE Senior,電子情報通信学会フェロー.





Balance plot for visualizing and examining tradeoff between accuracy and data quantity of lidar water vapor measurement data

Atsushi Takahashi¹, Tetsu Sakai², Takuya Kawabata², Satoru Yoshida², and Naonori Ueda¹

¹Riken Center for Advanced Intelligence Project, Nihonbashi 1-chome Mitsui Building, 15th floor, 1–4–1 Nihonbashi, Chuo-ku, Tokyo, Japan 103–0027 ²Meteorological Research Institute, 1–1 Nagamine Tsukuba, Ibaraki, Japan 305–0052

(Received March 3, 2022; revised June 7, 2022; revised August 16, 2022; accepted August 17, 2022)

Water vapor lidar has made it possible to continuously observe water vapor in the atmosphere and is a prominent tool for studying the hydrological cycle, cloud formation, and atmospheric convection. However, a standardized quality control method for managing the accuracy and number of available data has not been established, as well as a method for determining the appropriate spatial resolution. We propose a concise, visual framework in which observed data is plotted to determine the uncertainty threshold and spatial resolution of lidar data. Application of the method to observed data showed that it is effective for determining the optimum uncertainty threshold and the finest vertical resolution for balancing the accuracy and data quantity at every altitude range.

Key Words: Water vapor Raman lidar, Quality Control, Radiosonde, Spatial Resolution

1. Introduction

The radiosonde has been widely used in atmospheric science for measuring water vapor as it provides an accurate and dependable vertical profile. Despite its effectiveness, however, it is difficult to observe water vapor continuously because of restrictions on the available frequency of receivers at ground stations. Moreover, it is costly to launch radiosondes continuously.

To deal with these shortcomings, lidar (i.e., Light Detection and Ranging) has been introduced for continuous water vapor observation. Previous studies demonstrated the effectiveness of lidar for measuring the water vapor profile of the troposphere continuously.¹⁻³⁾ Subsequently, lidar observation of water vapor has been expected to be utilized for numerical weather forecasts.⁴⁾

Despite such success, there are still obstacles to expanding the use of lidar observation. First, a principle of data quality control needs to be established. Experimental methods for ensuring data accuracy were proposed in previous studies. For example, Dinoev et al.²⁾ used an uncertainty threshold of 10% to choose the optimum vertical resolution varying between 15 m and 300 m, while Sakai et al.'s case study⁵⁾ used an empirical uncertainty threshold of 30% at vertical resolutions of 75 m and 150 m for data quality control. Both studies intended to make data as accurate as possible, but they did not aim for balance between accuracy and the number of available data. A too strict uncertainty threshold results in data that is too sparse. A loose threshold increases the number of measurements; however, it prevents further analysis by assimilating data into numerical weather models due to large noise levels.

Determining the optimum spatial resolution is another concern. The vertical resolution of lidar measurements needs to be as fine as possible. However, in practice, it must be coarser at higher altitudes in order to maintain an adequate



signal-to-noise ratio. If the resolution is too coarse, the data may not be usable even if it is precise, while data with too fine of a resolution and a large error will not be applicable to numerical weather modeling.

It is necessary to balance attaining a fine spatial resolution and minimizing the measurement uncertainty. In this paper, we propose an intuitive and concise method of visualizing resolution and measurement uncertainty to determine the most optimal balance. In the following section, we demonstrate how our diagram identifies the optimum uncertainty threshold and vertical resolution using the dataset obtained with the Raman lidar used by Sakai et al.'s case study⁵⁾.

2. Data and instrument

2.1 Water vapor Raman lidar

2.1.1 Instrument

The water vapor Raman lidar used in our study was developed by the Meteorological Research Institute (MRI) of Japan. Details of the lidar system and the results of the comparison with collocated radiosonde, the global navigation satellite system (GNSS), and objective analysis data are given in Sakai et al. (2019). The lidar utilizes tripled harmonics of a Nd:YAG laser operating at 355 nm with 220 mJ/pulse, a 35-cm diameter Cassegrain telescope, receiving optics, and a data acquisition system. Raman backscattering is detected from water vapor (407.5 nm) and nitrogen (386.7 nm), and elastic backscattering from air molecules and particles (355 nm). The signals are acquired with a transient recorder operating in photon-counting mode (20 MHz) and analog mode (12 bit). The original data resolution in the temporal and vertical directions was 1 min and 7.5 m, respectively.⁵ The data analysis procedure for deriving water vapor mixing ratio (W) and its uncertainty (dW) is given by Sakai et al. (2019). The values of dW are estimated from the measured photon counts assuming Poisson statistics.⁶ Note that the value of dW estimated from the observed photon counts is composed of the error from the precision of the lidar instrument itself⁶ and the water vapor concentration in the air varying during the measuring time window (20 min.) (D. N. Whiteman, personal communication, 26 April 2021).

2.1.2 Lidar observation and data

Lidar water vapor was observed from August 2016 to December 2016 in Tsukuba, Japan. We averaged the raw data every 20 minutes in the temporal direction. For the vertical direction, we averaged the raw data with six different vertical resolutions, 15 m, 75 m, 150 m, 300 m, 600 m, and 900 m, to examine which resolution would balance accuracy and number of available data at each altitude.

2.2 Radiosonde data

We used two types of radiosondes (RS-11G, Meisei Electric, Co., Japan and RS92, Vaisala, Finland) as reference to validate the lidar data. The radiosondes were launched twice daily at 08:30 and 20:30 LST and weekly at 14:30 JST from an aerological observatory located 80 m northeast of the lidar. The temporal resolutions of the measured data were 1 sec for RS-11G and 2 sec for RS92, which correspond to the vertical resolutions of ~ 6 m and ~ 12 m, respectively. For quality control, Global Climate Observing System (GCOS) Reference Upper-Air network (GRUAN) data processing algorithms were applied to the raw data.⁷⁾ The measurement uncertainties of relative humidity by the radiosondes were reported to be 5% and 3–5% for RS-11G⁸⁾ and RS92⁷⁾, respectively.

3. Proposed method

3.1. Balance plot drawing

The value of dW/W represents the relative uncertainty of the measurements, and the conventional quality control method classifies data on the basis of whether dW/W is greater than or less than 0.3^{5} . However, this threshold value is given empirically and not objectively determined. In addition, the vertical resolution in the conventional method is uniform, but in reality, it needs to be adjusted for the observation altitude. Here, we introduce our method for determining the optimum threshold value of the measurement uncertainty for quality control and spatial resolution. First, we pair the lidar data with the radiosonde data recorded during the same measurement periods and at the same altitudes. These



pairs of data are sorted by dW/W values. Then we divide the dataset into sub-datasets on the basis of the altitude ranges. In other words, the data is in layers corresponding to altitude ranges. In our case study, we divide the data into 500-m layers below an altitude of 2,000 m. Above 2,000 m, we divide the data into 1,000-m layers. Then we use the root mean square error (RMSE) of the lidar and radiosonde data for the error metric. We introduce φ to denote the threshold value of dW/W and calculate the RMSE values using data with dW/W values below φ .

$$RMSE_{i}(\varphi) = \sqrt{\frac{1}{n_{i}(\varphi)} \sum_{j=1}^{n_{i}(\varphi)} \left(d_{j,lidar}(z,t,\varphi) - d_{j,sonde}(z,t) \right)^{2}}$$
(1)

z and t denote altitude and time, respectively. $d_{lidar}(\varphi)$ denotes the water vapor mixing ratio measured by lidar with dW/W less than φ . d_{sonde} denotes the water vapor mixing ratio obtained by radiosonde observation. *i* is the index of altitude ranges. $n(\varphi)$ is the number of available data whose dW/W are less than φ .



Fig. 1 Concept of proposed balance plot. (a): Table of dataset for all altitude ranges; lidar and radiosonde data recorded at the same altitude and time are paired. (b): The paired data are plotted in a scatter chart of RMSE values between lidar and radiosonde data vs. number of data. The symbols in the scatter chart are colored according to the color scale for the uncertainty threshold φ . The dashed black line represents the accuracy lower bound. A dashed colored line is a regression line that connects the origin of the coordinate and every datum. (c): The slope of the line corresponds to the ratio of RMSE value to the number of data. The optimum φ value corresponds to the bottom most green star, where the ratio of RMSE value to the number of data is minimum. (d): Application of proposed method to determine optimum vertical resolution. (e): Vertical resolution data is plotted and connected with corresponding colored lines. (f): The vertical resolution is determined by comparing their minimum slope value. The smallest slope value of the 15-m resolution in this altitude range.



Next, we prepare a scatter chart that takes the number of available data for the horizontal axis and the corresponding RMSE value for the vertical axis (Fig. 1; hereinafter, "balance plot"). The horizontal dashed line represents the target accuracy, which our quality control must achieve. The lines were drawn at 1.5 g/kg for daytime and 1.0 g/kg for night-time in our case study. These accuracy targets are based on the case study in Sakai et al. (2019). Then we plot the n (φ) and RMSE (φ) in the scatter chart. The trade-off between n (φ) and RMSE (φ) is visualized for every φ ; φ ranges from 0 to 1 in increments of 0.05. The data in the scatter chart are colored according to the φ value. If more data is available, the corresponding datum is on the right side of the diagram. The data under the dashed line satisfies the target accuracy.

3.2. Balance plot comprehension

The bottom right most data indicates the most optimal balance of accuracy and amount of data (Fig. 1b). In other words, the slope of the regression line connecting the origin of the coordinates and the datum is smallest. In order to uniquely identify which φ value yields the smallest slope, we introduce another plot (Fig. 1c). In this plot, we take the slope of the regression lines for the vertical axis and φ value for the horizontal axis. As illustrated by the example in Fig. 1c, we can identify the most optimal balance (the light green star) and the corresponding φ value is 0.6.

3.3. Application to spatial resolution comparison

With a slight extension, this chart can also be used to identify the appropriate spatial resolution for all altitude ranges (Fig. 1d–1f). we prepared paired data with different spatial resolutions (Fig. 1d) and plot the data together with those of other spatial resolutions (Fig. 1e). The slopes of the regression lines are also shown for each vertical resolution as in Fig. 1c. The vertical resolution that contains the bottom most data is the optimum vertical resolution, which is the 15-m resolution (denoted with blue lines) in this plot. We will apply this chart to the observed data to identify the optimal resolution and threshold value in Section 4.

4. Case study

We applied our method to the dataset during daytime and nighttime separately to determine the optimum values because the measurement altitude ranges of the Raman lidar differed depending on time of day. The range was usually between 200 m and 1,000–2,000 m during the day and between 200 m and 5,000–6,000 m at night in cloud free conditions. Daytime was from 6 a.m. to 6 p.m. local time, and the other twelve hours were nighttime. For the daytime dataset, we examined data for every 500-m altitude range below 2,000 m (experiment 1). For the nighttime dataset, we examined data for every 500-m altitude range below 2,000 m. From 2,000 m up to 8,000 m, we examined data for every 1,000-m altitude range (experiment 2).

4.1 Experiment 1: Daytime data

Fig. 2 shows the balance plot for daytime data for every 500 m up to 2,000 m. The corresponding dW/W is colored according to the color scale on the right hand side. The colored lines show the RMSE for each spatial resolution of the data. Fig. 3 shows the ratio of RMSE value to the number of available data for every dW/W in increments of 0.05. The minimum of the ratio is highlighted with a red dot as long as it satisfies the target accuracy. Fig. 4 is the balance plot in which the optimum thresholds for the vertical resolutions are highlighted with red dots.

Fig. 4a shows that a spatial resolution of 15 m is the most effective below the altitude of 500 m because it has the most available data and is sufficiently accurate. However, above 500 m, it is no longer accurate enough and the number of available data is not necessarily beneficial. Between 500 m and 1,000 m, the plot shows that 75 m is the ideal resolution as it yields one and a half times as many data as the 150-m resolution does. Above 1,000 m, there is very little data that is sufficiently accurate. We cannot say for certain what threshold of dW/W is the optimum and which spatial resolution is appropriate for that altitude. The optimum thresholds of uncertainty and spatial resolution for daytime data are summarized in Table 1.





Fig. 2 Balance plot of daytime data analysis at every 500 m up to 2,000 m. The circles represent the threshold of dW/W corresponding to the color scale on the right side of the figure. The spatial resolution is denoted by the colored lines (e.g., the solid orange line denotes 75-m vertical resolution).



Fig. 3 Horizontal axis denotes the value of dW/W and the vertical axis is the ratio of RMSE value to the number of available data. The red dots indicate the minimum of every vertical resolution as long as the accuracy lower bound is satisfied.





 Table 1
 Optimal spatial resolution and threshold balance for every altitude range in daytime data.

Altitude Range (m)	Vertical Resolution (m)	Threshold φ (dW/W)		
0-500 (m)	15	0.2		
500-1000 (m)	75	0.2		
1000-1500 (m)	15	0.15		
1500-2000 (m)	600	0.25		

4.2 Experiment 2: Nighttime data

Table 2 summarizes the optimal φ values and spatial resolutions for the nighttime data. Below an altitude of 1,000 m, the 15-m vertical resolution data is optimal in terms of accuracy and amount of available data (Fig. 5a-b, Fig. 6a-b). The 15-m resolution is also effective in the altitude range between 1,000 m and 1,500 m. Above 1,500 m, the 75-m reso-

e	8	
Altitude Range (m)	Vertical Resolution (m)	Threshold ϕ (dW/W)
0-500 (m)	15	0.1
500-1000 (m)	15	0.1
1000-1500 (m)	15	0.15
1500-2000 (m)	75	0.2
2000-3000 (m)	75	0.15
3000-4000 (m)	150	0.25
4000-5000 (m)	300	0.4
5000-6000 (m)	600	0.45

 Table 2
 Optimal spatial resolution and uncertainty threshold balance for every altitude range in nighttime data.









Fig. 6 Plots in Fig. 3 for nighttime data up to 8,000-m altitude. The most balanced cases in each resolution are highlighted with red dots.







lution outperforms the 15-m resolution (Fig. 6d). It requires a smaller uncertainty threshold than the empirical threshold, 0.3, to keep the RMSE value below the target accuracy. Between 2,000 m and 3,000 m, the 150-m resolution data is almost comparable in accuracy and amount of available data to those of the 75-m resolution data (Fig. 7e). The 150-m resolution yields more data than the 75-m resolution does in the 3,000–4,000-m altitude range (Fig. 7f). One layer above (4,000–5,000 m), the 300-m resolution data provides more available data than the 150-m resolution (Fig. 7g). At the next layer (5,000–6,000 m), the graph shows that the data of 300-m and 600-m resolutions are comparable (Fig. 7h). Above 6,000 m, we cannot conclude the optimal vertical resolution because the observation is limited (Fig. 5i-j).

5. Discussion

5.1 Optimum thresholds and spatial resolution

As seen in Fig. 2 and 5, the curves generally have a characteristic J-shape. The RMSE value is nearly constant as the number of available data increases as long as φ is low. By increasing the φ value, it reaches a tipping point, at which the accuracy suddenly decreases (RMSE value sharply increases). The J-shaped curves illustrate the trade-off between accuracy and the number of available data. The corner of the J-shaped curve indicates the most balanced situation. The most balanced spatial resolutions and corresponding uncertainty thresholds are summarized in Tables 1 and 2.

In addition, the optimum vertical resolution becomes coarser as the altitude increases (Tables 1 and 2). This indicates the trade-off between altitude and vertical resolution. In addition, judging from the decreasing number of available data (Fig. 5), the measurement limitation of our instruments may be 6,000 m. In other words, the characteristics of the instrument can be visualized by the balance plot.

Finally, we can see relatively larger (looser) uncertainty thresholds above 3,000 m at night (Table 2). We used the uniform target accuracy (RMSE<1.0 g/kg) at all altitudes despite the fact that the amount of water vapor decreases as altitude increases. We will have to reflect this effect in the target accuracy in practice. However, the desirable accuracy target depends on the surroundings of the observation sites and the subsequent applications. It is beyond the scope of this paper. Nevertheless, our proposed framework can be adjusted to any target accuracy and will work robustly as demonstrated in the case study.

5.2 Comparison with conventional method

The conventional quality control method in Sakai et al. (2019) was based on empirical evidence. It yielded data of uncertainty, dW/W, of less than 0.3 with 75-m resolution below 1,000m altitude and 150-m resolution above that. Our experiments show that the conventional method did not achieve the accuracy lower bound, particularly in daytime (Fig. 3). In contrast, our method requires a slightly smaller uncertainty threshold (Table 1). Furthermore, our diagram indicates that a finer spatial resolution, 15 m, is available in low altitude ranges. The number of available data increases due to the finer spatial resolution in addition to the strict threshold (Fig. 4). Specifically, the 15-m resolution is suitable below an altitude of 500 m during the daytime and below 1500 m at night. The empirical vertical resolution, 150 m, is less effective than the 75-m resolution below 3,000 m. From these results, we can conclude that the optimum thresholds and vertical resolution determined by our method improve the quality of data more effectively than the conventional method.

5.3 Suggestions and implications

We propose two extensions of our method. The first is an application in the temporal direction. In practice, the desirable temporal resolution depends on the subsequent numerical weather models. Ideally, an optimum temporal resolution can be identified by simply replacing vertical resolutions with temporal resolutions. Tradeoffs of data observed with different spatial and temporal resolutions can also be compared and optimized. However, we need to keep in mind that results from temporal resolutions shorter or longer than 20-minutes should be evaluated by more frequent radiosonde observation. Another extension is using a different error metric because our method is compatible with other error metrics such as the mean absolute error.

Given that the amount of water vapor in the air varies with region and season, whether the same threshold is applica-



ble to observed data in different regions (or seasons) is a reasonable concern. Because the amount of data we used in this study is limited, it is difficult to assess exact issues that arise from the difference in seasons. However, previous studies have provided insight into this concern. Yoshida et al.⁹⁾ conducted their observation in Nagasaki (western Japan) using the lidar instruments and empirical quality control method identical to those of Sakai et al. Even though the study area in Yoshida et al. was geographically distant from that of Sakai et al.'s, the results did not suffer from any significant quality control problems that arise in the conventional method. This indicates that rather than regional variation, the characteristics of lidar instruments may have more impact on measurement quality. The characteristics of lidar instruments, such as the power of the laser, area of the receiver telescope, and the detector's sensitivity, can vary greatly. Thus, differences in instruments should be assessed prior to lidar observation. By using the balance plot to show data obtained from parallel observation with two lidar instruments, we can visually identify and compare the performance of instruments. Our proposed diagram is robust and can potentially be expanded for lidar data quality control.

6. Concluding remarks

We devised a diagram that handles multiple information in a 2D plot to visualize the contradictory demands of accuracy and number of available data for lidar water vapor measurement. The optimum vertical resolution is also determined by using the diagram for comparison. A case study with real data shows the trade-off between the optimum vertical resolution and available data at various altitude ranges. The trade-off reflects the characteristics of our lidar instrument. This suggests our balance plot is useful for comparing the performance of lidar instruments. Lastly, we demonstrated that our robust and expansive balance plot can improve the quality control of geophysical data.

Acknowledgements

We are grateful to Dr. Naoto Yokoya and Dr. Tatsumi Uezato for their valuable discussion on our study. We used radiosonde data measured by the Japan Meteorological Agency. The high resolution radiosonde data were provided by Mr. Shunsuke Hoshino at Aerological Observatory (current affiliation is numerical prediction division, information infrastructure department of Japan Meteorological Agency).

References

- D. N. Whiteman, K. Rush, S. Rabenhorst, W. Welch, M. Cadirola, G. McIntire, R. Felicita, A. Mariana, V. Demetrius, C. Rasheen, V. Igor, F. Ricardo, M. Bernd, S. Bernhard, L. Thierry, M. Stuart, and H. Vömel, "Airborne and ground-based measurements using a high-performance Raman lidar," Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 27 (11), 1781–1801 (2010). https://doi.org/10.1175/2010JTECHA1391.1
- T. Dinoev, V. Simeonov, Y. Arshinov, S. Bobrovnikov, P. Ristori, B. Calpini, M. Parlange, and H. Bergh, "Raman lidar for meteorological observations, RALMO—Part 1: Instrument description," Atmospheric Measurement Techniques. 6 (5), 1329–1346 (2013).
- 3) T. Leblanc, I. S. McDermid, and T. D. Walsh, "Ground-based water vapor Raman lidar measurements up to the upper troposphere and lower stratosphere for long-term monitoring," Atmospheric Measurement Techniques. 5 (1), 17–36 (2012).
- 4) V. Wulfmeyer, R. M. Hardesty, D. D. Turner, A. Behrendt, M. P. Cadeddu, P. Di Girolamo, P. Schlüssel, J. Van Baelen, and F. Zus, "A review of the remote sensing of lower tropospheric thermodynamic profiles and its indispensable role for the understanding and the simulation of water and energy cycles," Rev. Geophys. 53, 819–895, doi:10.1002/2014RG000476, 2015.
- 5) T. Sakai, T. Nagai, T. Izumi, S. Yoshida, and Y. Shoji, "Automated compact mobile Raman lidar for water vapor measurement: instrument description and validation by comparison with radiosonde, GNSS, and high-resolution objective analysis," Atmospheric Measurement Techniques. **12** (1), 313–326 (2019).
- 6) D. N. Whiteman, "Examination of the traditional Raman lidar technique. II. Evaluating the ratios for water vapor and aerosols," Applied Optics. **42**, 2593–2608 (2003).
- 7) R. J. Dirksen, M. Sommer, F. J. Immler, D. F. Hurst, R. Kivi, and H. Vömel, "Reference quality upper-air measurements: GRUAN data processing for the Vaisala RS92 radiosonde," Atmos. Meas. Tech., 7, 4463–4490, doi:10.5194/amt-7-4463– 2014 (2014).
- 8) N. Kizu, T. Sugidachi, E. Kobayashi, S. Hoshino, K. Shimizu, R. Maeda, and M. Fujiwara, Technical characteristics and GRUAN data processing for the Meisei RS-11G and iMS-100 radiosondes, GRUAN Technical document, 5. https://www. gruan.org/gruan/editor/documents/gruan/GRUAN-TD-5_MeiseiRadiosondes_v1_20180221.pdf, 2018. (Accessed


2022.8.16)

9) S. Yoshida, T. Sakai, T. Nagai, Y. Ikuta, Y. Shoji, H. Seko, and K. Shiraishi, Lidar Observations and Data Assimilation of Low-Level Moist Inflows Causing Severe Local Rainfall Associated with a Mesoscale Convective System, Monthly Weather Review. 150 (7), 1781–1798 (2022).

Author Introduction

Corresponding author: Atsushi Takahashi

Doctor of Science, September, 2019, Kyoto University, Kyoto Japan. RIKEN AIP Postdoctoral researcher (2019-present)





学会誌への投稿案内

レーザセンシング学会誌では、レーザセンシングに関する研究・技術や最新の研究成果に関する、「論 文」、「総説(レビュー)」、「小論文(レター)」、および「解説」記事を、会員・非会員を問わず随時応募し ています.投稿に関する手続きや要件については、本号「学会だより」に掲載されている投稿規程および執 筆要領を参照ください.また、学会ホームページ(https://laser-sensing.jp/)から投稿規程、執筆要領と共に 執筆のためのテンプレートもダウンロード頂けます、学会誌は年2回(4月および10月)の発刊となって います.皆様の投稿をお待ちしています.





レーザセンシング学会規程

学会誌投稿規程

平成31 (2019) 年 4月10日 制定 令和元 (2019) 年 7月17日 改訂 令和 2 (2020) 年10月31日 改訂

- (目 的)
- 第1条 本規程は、レーザセンシング学会(以下、「本会」という)が、レーザセンシングに関 する研究・技術や最新の研究成果を広く紹介するために発行する学会誌への投稿及び編 集に関する基本的な事項を定める。

(名 称)

第2条 本学会誌の名称を、レーザセンシング学会誌(以下、「本誌」という)とする。

(使用言語)

- 第3条 本誌の使用言語は、日本語又は英語とする。
- 2 本誌に掲載する記事等に日本語を使用する場合には、英文の題名と要旨を付するものと する。

(発行回数)

第4条 本誌は、年度毎に2回発行する。

(掲載記事)

- 第5条 本誌に掲載される記事は、本会の会則等に定められた本会の目的に合致するものとする。
 - 2 本誌には、論文及び解説等を掲載する。
 - 3 論文は、新規性のある未発表の原著論文とする。

(著者の要件)

- 第6条 本誌への投稿については、著者についての制限は設けない。
 - 2 すべての著者は、当該記事の内容全般について責任を負うものとする。
 - 3 論文の著者は、その作成に不可欠の貢献をした者に限るものとする、

(編 集)

- 第7条 本誌の編集は、編集委員会が行う。
 - 2 論文については少なくとも2名、解説等については1名の査読者による査読を行う。

(原稿の受理)

第8条 編集委員会が原稿を受理した日をもって受理日とする。

(費用負担)

- 第9条 本会は、記事の掲載に関し、著者に費用の負担を求めることができる。
 - 2 費用負担の詳細については別途定める。
 - 3 編集委員会から執筆を依頼した記事については、費用負担を求めない。

(著作権)

- 第10条 本誌に掲載された記事の著作権は、本会に帰属する。
 - 2 本誌に掲載される記事において、著作権の許諾が必要な転載等がある場合には、著者が 予め当該部分の著作権者から利用許諾を受けておくものとする。
 - 3 同一の原稿あるいは内容が実質的に同じであると判断される原稿を、本誌と他の刊行物 に重複して投稿することはこれを認めない。



(委任) 第11条 この規程に定めのない編集の実施に関する事項は、編集委員会が定める。

附 則

1 この規程は、平成31 (2019) 年 4月10日より施行する。

平成31 (2019) 年 4月10日 制定・施行 令和元 (2019) 年 7月17日 改訂 第7条第2項修正 令和 2 (2020) 年10月31日 改訂 第9条第1項修正





レーザセンシング学会誌執筆要領

レーザセンシング学会誌編集委員会

令和3(2021)年4月1日制定・施行 令和3(2021)年9月30日改訂 令和4(2022)年4月1日改訂

1. 言語

日本語または英語を使用すること.

- 2. 原稿の作成と提出
- 本学会ホームページより A4 規格のテンプレートをダウンロードし、テンプレートを参考に作成すること.
- ② テキストは Word 形式のファイルを提出すること. 査読者の便宜を図るため,ページ番号,本文に行番 号を付けること.
- ③ 図は tif, jpg, PDF 等の形式のファイルを提出すること,画像の場合は 300dpi 程度の高解像度で低圧縮又 は無圧縮のファイルを提出すること.
- ④ 表は PDF 形式のファイルを提出すること.
- ⑤ 原稿及び図表等のファイルは、本学会ホームページよりダウンロードした投稿フォームを添えて、本学 会編集委員会(lrsj-edit_office@laser-sensing.jp) 宛に提出すること.
- 3. 論文等の長さ(目安)
- ① 論文:15,000 字~30,000 字
- ② 総説:20,000字以内
- ③ 小論文:15,000 字以内
- ④ 解説:20,000 字以内
- ⑤ 図表に対応する文字カウント数は、標準的な大きさ、縦横比の図の場合で400字/個程度となる.
- ⑥ その他は内容を十分に伝えることの出来る最適の長さとすること.
- *刷り上がり目安としては、2500字程度/ページとなる.

4. 掲載料

- 刷り上がり1ページにつき2,500円の負担とする.ただし、学会誌編集委員会から依頼された原稿については、掲載料は徴収しない.
- ② 超過分(「3. 論文等の長さ」参照)の掲載については実費を徴収する.但し、編集委員会が認めた場合はこの限りではない.
- *会員・非会員の別はない.
- 5. 論文等の構成

論文等の原稿は、次の順序で作成すること.

- 論文題名(和文)
- ② 論文題名(英文)
- ③ 著者名(和文)(連絡著者に*を付すこと)
- ④ 所属および住所(和文)(英文原稿の場合は不要)
- ⑤ 著者名(英文)(連絡著者に*を付すこと)
- ⑥ 所属および住所(英文)
- ⑦ 概要(英文, 150 語以内)(論文・総説(レビュー)・小論文は必須. その他の原稿は任意)



- ⑧ キーワード (4~5ワード)
- ⑨ キーワード (英文) (4~5 ワード)
- ⑩ 本文(和文)
- ① 謝辞(和文)
- 12 データ利用可能性(Data availability)(和文)
- ① 研究費 (Funding) (和文)
- ④ 利益相反の開示 (Disclosure) (和文)
- ⑤ 引用文献
- 16 付録 (和文)
- ① 著者紹介(和文)(各著者 300 字以内)
 - ・解説記事は、著者紹介用写真を投稿時に提出すること.
 - ・解説以外の記事は、著者紹介用写真を採録決定後に提出すること.
 - ・巻頭言には、著者紹介の掲載はありません.
- 18 すべての図, 写真, 表
 - ・図,写真,表は本文原稿中に挿入せず,別のシートとして作成すること.ただし,文中に,図表の挿入 箇所については記載すること.
 - ・脚注は原則として英語とする.
 - なお英文原稿の場合は、上記の構成で、10~18を英文にすること.
- 6. 用字と用語
- ① 特殊な用語や略語が多用される場合は、参考文献の次に用語・略語の説明をまとめることが望ましい.
- ② 句読点は、句点「。」と読点「、」を用いず、「.」、「、」を用いる. それぞれ全角 を用いること. (な お、参考文献リストおよび英文の場合は、半角の「.」、「、」とし、その後に単語が続く場合は、半角ス ペースをひとつ入れること. 詳細は付録参照)
- 7. 見出しについて
- ① 大見出し"1."など左つめ
- ② 中見出し"1.1"など左つめ
- ③ 小見出し "1.1.1" など左つめ これより下位のレベルは,著者の任意とする.
- 8. 図, 写真, 表
- ① 全ての図,写真,表は、本文中で引用すること.
- おおよその図表挿入位置を、本文中に、たとえば [Fig. 1]

のように、明記すること.

- ③ 図表の中の用語および説明は、原則として英語を用いること.
- ④ 図,写真,表は、論文の最後にまとめること.
- 図表の説明
 - (例1)表および図(カラーを含んで本文中に挿入する場合)
 - 表のとき: Table 1, Table 2,, Table 10,
 - 図または写真のとき: Fig. 1, Fig. 2,, Fig. 10
 - カラー写真等で、本文中ではなく論文最後にまとめて掲載する場合: Plate 1, Plate 2,, Plate 10
 - (例 2) 文章中の表現 を Fig. 1, Table 1 および Plate 1 に示す.
 - Fig. 1 Concept of laser sensing systems.
 - Table 1 Summary of space-based active sensors.



- 9. 引用文献
- ① 引用文献の範囲

原則として公開出版物の範囲に留めること.

② 引用の仕方

本文中の該当する箇所に半角で"1)"等の上つき番号を出現順に付けて引用すること.

③ 引用文献リストの書き方

引用文献リストは付録の形式を参考にして作成すること.著者が複数の場合も,原則として全著者の氏名 (英語の場合は氏とイニシャル)を記入すること.英文論文標題中の単語については,文頭および固有名 称などで必要な場合以外は小文字を使用すること.

4 雑誌名の略記

通常,学術雑誌名は(特に英文雑誌などでは)かなり長いので,雑誌名の理解を妨げない範囲で略記を行 なってよい.また編集段階において,学会側で略記形式に変更することがある.

- ⑤ 査読者が入手しにくい引用文献は、編集委員会の判断でコピーなどの提出を求めることがある。
- ⑥ ウェブサイトを引用する場合は、最終アクセス日付を(2020.8.1)のように記載すること.
- 10. 他誌から本誌に引用する場合の注意
- ① 引用する文献の著作権に十分注意すること.
- ② 図面・表・写真を他の図書,雑誌などから引用する場合には,著者の責任で事前にその著者および出版 社の了承を得ること。

付録 引用文献リストの書き方(ガイドライン)

- 1. 雑誌
- 1) 著者名,"標題,"雑誌名. 卷(号),始め一終りのページ(年(西暦)).
- 2) 東京太郎, 大阪次郎, "レーザセンシング学会誌の書き方,"レーザセンシング学会誌. 18 (1), 20-27 (2018).
- 3) T. Tokyo and J. Osaka, "How to write LRSJ," J. Laser Radar Sens. Soc. Japan. 18 (1), 20–27 (2018).
- 2. 著書, 編書
- 1) (編) 著者名,書名,発行所 (発行年 (西暦)).
- 2) 東京太郎 (編), レーザセンシング技術辞典, レーザセンシング出版 (2018).
- 3) T. Tokyo (ed.), Handbook of Laser Sensing, LRSJ Publ. Co. (2018).
- 3. 著書の一部を引用する場合
- 1) 著者名, "表題,"書名, 編者名(発行所,発行年(西暦)),始め一終りのページ.
- 2) 大阪次郎, "レーザセンサ,"レーザセンシング技術辞典, 東京太郎編 (レーザセンシング出版, 2018), pp. 145-250.
- 3) J. Osaka, "Laser Sensor," in Laser Sensing Handbook, T. Tokyo, ed. (LRSJ Publ. Co., 2018), pp. 145-250.
- 4. 学会·会議
- 1) 著者名, "表題," 会議名, 都市名, 国名, (年(西暦)).
- 2) 東京太郎, 大阪次郎, "レーザセンシングの研究方法,"国際レーザーレーダーシンポジウム, 東京, 日本 (2018).
- 3) T. Tokyo and J. Osaka, "How to study laser sensing," in Inter. Symp. on Laser Radar, Tokyo, Japan (2018).



- 5. 学会・会議論文集
- 1) 著者名, "標題,"学会論文集名. 巻 (号), 始め一終りのページ (年 (西暦)).
- 2) 東京太郎, 大阪次郎, "レーザセンシングデータの研究方法," 第 40 回国際レーザセンシングシンポジウム. 18, 950-953 (2018).
- T. Tokyo, and J. Osaka, "How to study laser sensing," Proc. 40th Inter. Symp. on Laser Sensing. 18, 950–953 (2018).
- 6. インターネットサイトの引用
- 1) 著者名, "標題," URL (最終アクセス年月日)
- 2) 東京太郎, "レーザセンシングデータの研究方法," https://laser-sensing.jp/gakkaishi.html (Accessed 2019.12.19)
- 3) T. Tokyo, "How to study laser sensing," https://laser-sensing.jp/gakkaishi.html (Accessed 2019.12.19) (著者不明の場合は、和文では「著者不明」、英文では「Anonymous」とする)
- 7. 日本語での著者名に関する注意事項 姓と名の記述は,次の例にならうこと:東京太郎,鈴木」正,泉」宏治,林」誠,森信一郎,山田洋一郎



	(テンプレート例)					
1	ここに日本語タイトルを書いて下さい					
2	English title must be written in this style					
3 4	未来陽葵*1, 光 蓮2, アトモス ユイナ1,3					
5	レーザセンシング学会(〒123-1234 住所)					
6	² 所属(〒123-1234 住所)					
7	3所属(〒123-1234 住所)					
8						
9	Himari Mirai ^{*1} , Ren Hikari ² , and Yuina Atmos ^{1, 3}					
10	¹ Laser Radar Society of Japan, 1-1 Address, Tokyo 123-1234					
11	² Laser Radar Society of Japan, 1-1 Address, Tokyo 123-1234					
12	³ Laser Radar Society of Japan, 1-1 Address, Tokyo 123-1234					
13 14	(Dessived VVVVVV, suised VVVVVV, second d VVVVVVV) * 事政已記] 笠託につき このキキ球し ブニキリ					
15	$($ Received AAAAAAAA, ievised AAAAAAAA, accepted AAAAAAAA $)$ 争勿向起入固所に \mathcal{I} このよよ残し $($ \mathcal{I} \mathcal{I} \mathcal{I}					
16	Author must place the abstract here. Abstracts and keywords are necessary for original paper and review paper. The					
17	abstract should not exceed 150 words and keywords (in noun forms) should not exceed 5 words.					
18						
19	キーワード:レーザー,非線形光学,結晶					
20	Key Words: Laser, Nonlinear optics, Crystal					
21						
22	1. はじめに					
23	原稿作成に際しては以下の注意事項に従ってください. ただし, このテンプレートで作成した原稿がそのまま					
24	掲載されるわけではありません.					
25						
26	2. 論文題目·著者名·所属					
27	2.1 タイトル					
28	論文題目は論文の内容を的確かつ簡潔に表すように記述して下さい. 文字数は, 和文:35字以内, 英文:15					
29	ワード以内とし,略語は使用しないで下さい. やむを得ず長くなるときは,刷り上がり各項のフッタに使用する省					
30	略題目を併記して下さい. 和文表題には・, /を使用しないで下さい. 表題中のハイフンの後は大文字として下					
31	さい. 英文表題は先頭文字のみ大文字として下さい.					
32						
33	2.2 著者名					
34	和文著者名では姓と名の間は半角スペースを入れてください. 但し, 姓と名が1文字の場合は全角スペースを					
35	入れてください.この姓と名のスペースは本文中,参考文献でも同様にして下さい.英文著者名では姓・名とも					
36	に先頭文字のみ大文字として下さい.					
37						
38	2.3 所属					
39	著者が複数の場合,和英共に氏名の後にカンマを入れて下さい.英文では著者が多数の場合,最後の著者					
40	の前に"and"を入れ,著者が2名の場合はその上でカンマを削除して下さい.著者の所属が異なる場合は、著					
41	者名の右肩に1,2,3のように数字を付けて区別して下さい.また,研究場所が現在の所属と異なる場合は、現					
42	所属も併記して下さい. (現所属は脚注として記載して下さい.)					
43						
44	3. 要旨・キーワード					
45	掲載区分が,原著論文および解説の場合は,150ワード以内の英文要旨(Abstract)と5個以内の英文キーワ					

46 ード(名詞形)を記述して下さい.また,英文要旨は、英文題目と共に必ずネイティブチェックを受けて下さい.



(テンプレート例)

- 47 なお,投稿者から希望があれば,編集委員会からネイティブチェック業者に依頼します(有料,タイトルとアブス
 48 トラクトのみの場合は,3,000円程度).
- **50** 4. 文章に関わる注意事項
- 51 4.1 本文

49

52 原則として常用漢字新仮名づかいを用いて下さい.術語はレーザセンシング学会および文部省で制定され
 53 たものを用いることが望ましいです.人名,日本語に十分定着していない術語などは原則として原綴で書いて
 54 下さい.欧語の原綴を日本語に混用する時は出来るだけ英語を用い,英,仏,独,露語などの混用を避けて下
 55 さい.

56 本文の文章は、指定がない限り和文はMS明朝、英文はtimesなどの明朝体として下さい、読点、句読点はピ
 57 リオド(和文:全角ピリオド)、カンマ(和文:全角カンマ)に統一して下さい、ただしスラッシュ(/)、%は和文中であっても半角を用いて下さい。

59 60 4.2 見出し

61 論文項目の番号付けは、大項目を 1, 2, ・・・として中央揃えとし、中項目を 1.1, 1.2, ・・・, 小項目を 1.1.1,
 62 1.1.2, ・・・として左詰めとして下さい.

63 64 4.3 記号

- 65 単位は立体記号とし、同一論文中で表記を統一して下さい.また原則としてSI単位系を用いて下さい.数値と 66 単位の間は、和英文とも半角スペースとして下さい.ギリシャ文字は指定のない限りsymbol書体に統一して下さ 67 い.ただし、 $\Gamma(ガンマ)$ 、 $\Phi(ファイ)$ 、 $\Sigma(シグマ)$ 、及び単位の $\mu(マイクロ)$ 、 $\Omega(オメガ)等は立体として下さい.$ 68 略語スペルアウトの形式は、フルスペル(略語)、和文(フルスペル:略語)を推奨します(例:Chirped Pulse
- 69 Amplification (CPA), チャープパルス増幅(Chirped Pulse Amplification: CPA)).

70

71 4.4 数式

72 数式は数式専用のソフトを利用して作成して下さい.変数(物理量)はイタリックとし、関数を表す文字(sin, cos
73 等)は立体として下さい.数式は通し番号をつけ、長い時は圧縮せずに複数行にして下さい.文中ではセンタリ
74 ングですが、複数行に渡る場合は全体をセンタリングして下さい.

75 (例)屈折率nは次のように表せる.

$$n(x) \cong n_{\infty} + \frac{c}{2\pi\nu_o} \left\{ \frac{\Delta\nu_D}{2(\ln 2)^{1/2}} x + \frac{G}{\sigma} \phi' \left(0, y/\sigma\right) exp\left\{-\pi^{1/2} \left(y/s\right) \left(I_t/I_s\right)\right\} \right\}$$
(1)

77 5. 図, 写真および表

78 図表は原則として図表ソフトで作成し、表題、説明文および挿入文字は全て英文を使用して下さい、文字フォ
79 ントは、図(英文)はゴシック系(Helvetica, Arial)、表はTimes, ギリシャ文字はSymbolの使用を推奨します.図
80 中の用語サイズは掲載原稿で1.5 mm以上になるように注意して下さい、グラフ中には原則として縦横罫を入れ
81 ず、表は横罫および天地の双柱罫のみとし、縦罫は入れないでください、他の文献から引用した場合は、説明
82 文の右肩に引用文献番号を記載して下さい.

83



(テンプレート例)



84

85

Fig. 1 Image of future Japanese space-based DWL. ©TMU

- 86
- 87

Table 1 Specifications of future Japanese space-based CDWL and observation requirements.

Attribution	Concept		
Altitude (km)	<300		
Off-nadir angle (deg)	35		
Laser transmitter	Optical fber	Solid-state	
Wavelength (µm)	1.5	2	
Number of looks		1 or 2	
Pulse repetition rate (Hz)	150	30 x 2	
Energy per pulse (mJ)	50	90	
Telescope diameter (m)	0.6		
Telescope type	Off-axis		
Detector		InGaAs PD	
Target horizontal resolution (km)		50	
Target vertical resolution (km)		(Vector wind error (m/s))	
Altitude 0-3 (km)	0.5	1	
Altitude 3-8 (km)	1	2	
Altitude 8-20 (km)	2	4	

88 89

90 図(写真)は(モノクロではなく)カラーを推奨します.カラーにするための掲載費用はかかりません.

91 図番号は本文中で参照する際は、文頭ではFigure+数字を用い、文中ではFig.+数字も可とします.また表
 92 番号はTable+数字を用いて下さい.グラフの縦軸、横軸は値と単位を明記し、単位の表記は(nm)のように、

93 (単位)として下さい. ただしArbitrary unitは"arb. unit"として下さい("a. u."はatomic unit). 図中の文字は先頭の
 94 み大文字とし,値と単位の略語の間には半角スペースを入れて下さい(例 10 nm, 10 fs, 10 V). ただし,値と単

95 位の記号の間にはスペースは入れないで下さい(例 10°, 10°C, \$10).

96

97 謝辞、データ利用可能性(Data availability)、研究費(Funding)、利益相反の開示(Disclosure)

98 記事の内容に応じて,適宜記述ください.必要ない場合は削除して下さい.

99 100 引用文献

101 原則として以下の形式で記述して下さい.参考文献は通し番号をつけ,本文の末尾に一括して記述して下さ
 102 い.本文中では引用箇所(文)の右肩に¹¹,^{1,21},¹⁻⁵¹のように番号を記入して下さい.引用文献の書き方について
 103 は,付録「引用文献リストの書き方(ガイドライン)」を参照ください.

- 104 注1)著者は全員の氏名を記述してください. 但し 10 名を超える場合, 11 番目以降の省略 (et al.)を認めます.
 105 注2)論文等のタイトルは省略しないでください.
- 106

107 付録

- 108 付録が必要ない場合は削除して下さい.
- 109



(テンプレート例)

- 110 著者紹介
- 111 各著者について300字以内で紹介文を記述して下さい.筆頭著者は必須としますが,共著者は任意としま
- 112 す. 著者紹介用写真の掲載については, 筆頭・共著共に任意とします. 著者紹介用写真は, 解説記事は投稿
- 113 時に提出して下さい. 解説記事以外の記事は, 採録決定後に提出して下さい.
- 114 115





レーザセンシング学会誌投稿フォーム(1)

施行 令和4年1月1日

掲載希望の種別	論文, 総説(レビュー), 巻頭言, 学位論文紹介	小論文,技術報(,研究会だより, :	告、解説, 会員からの声, ニュース, 書評,	揭示板	
いいで囲つに下さい)	その他				
表題(和文) 英文原	雨稿の場合も書いて下さい				
Title (English)					
(Linghini)					
著者名	Author in full name	所属	会員区分 (Oで囲って下	} 「さい)	会員番号
			正・学・賛・	非	
			正・学・賛・	非	
			正·学·賛·	非	
			正·学·賛·	非	
			正·学·賛·	非	
			 正·学·賛·	非	
				非	
					1
同 電話番号					
同 FAX番号					
同 e-mail					
同 郵便宛先	Ŧ				
	水―ジ 図巻	事物 事物			
ホーワード(4-5語)		x , 1x x x	, 子兵 15		
キーワード(英文)	(4-5語)				
事務局への通信構	間(Messeage to Editorial B	oard)			
希望する査読者(3~5名)(査読者の連絡5	E:メールアドレス)		
(Recommended rev	viewer(3 to 5 persons) (Co	ntact information	of reveiwer: E-mail))		
•その他(Others)					
主 农口 卿					
爭務局儞	受付年月日		受付番号		
※著者は送信前に	ニチェックしてください。	<u>+</u>			+
チェックリス	い 著 者	事務局	チェックリスト	著者	事務局
<u> </u>			<u> </u>		
表			キーワード		
写真			著者紹介		
投稿フォー	Д		投稿規定に準拠しているか		
著者名表記			引用文献の書き方は適切か		
※ 者有から編集委 合 本誌プロセフロ	ミ貝会およい宜読者への= 「必要ですので 必ず=∃≢	Iメントを記載する L <i>てく</i> ださい	投稿ノオーム(2)が続きます。	東文または小	い調文の場
			L & L .		

①最初の投稿では、原稿のファイルと投稿フォームをお送りください。 ②原稿の送付先は、一般社団法人 レーザセンシング学会 編集委員会 E-mail:<u>lrsj-edit_office@laser-sensing.jp</u> に お願い致します。



レ	・一サセンシンク字会誌投稿フォーム(2)	
※ 諸	★文・小論文の場合、査読プロセスに必要ですので、必ず記載してください。	
	This sheet is required for reviewing a paper or a communication	
揭載希望種別		
Category	Ppaper • Communication	
表題		
Title		
筆頭著者名		
First Author		
Q1 Abstract および本文(図表を含む)で、この論文の新規性(速報性を含む)をもっともよく表す記述	よどこですか?箇所
を簡潔に説明してください		.4. *
Please identify and brid	efly explain the sentences (or figures/tables) that typically show the novelty of	this paper
(including rapid dissemina		
O2 Abstraat お上び本文(の館湖に説明して
Q2 ADSURACE のよいかスト	図衣を書む) に、この調文の有効性(心力圧を含む)を小す 記述はとことすん	い? 間泳に就明して
Please identify and brie	fly explain the sentences (or figures/tables) that explain the effectiveness (inclu	uding applicability
of the method) given in th	is paper.	ading appreciating
01 412 112 112 112		
	いですかっき囲け恐躍していませんか?	
Q4 記述は子別印に止い	ッとりか ? 調理は飛進しているビルか ? iciently logical as a scientific naper? Is the conclusion well supported by evide	ncel
is the description sum	Iciently logical as a scientific paper : is the conclusion wen supported by eviden	
はい Yes・いいえ M	No (コメント:)
~		
	とって分かりやすく猫かれていますか? 凶衣の又子は週止な大ささじゅか :	2
Have the description a	and figures/tables been prepared so that the reader can understand them easily?	
はい Yes・いいえ N	Io (コメント:)
※原稿が上記の基準を	満たしていないと編集委員会が判断した場合、査読者に査読を依頼する前に	こ著者に修正をお願
いする場合かあります。	予めご了承ください。	1 / 41
The editor will make a	a judgment if the manuscript satisfies all the above criteria before it is subjected	1 to the reviewing
process.		





会員数の状況

会員

(2022年9月2日現在)
正会員 : 95
学生会員:10
賛助会員:8
名誉会員:10 (内正会員7)

入会会員

(2021年9月1日から2022年9月2日まで)
正会員 12名
学生会員 9名
賛助会員 0社

〈正会員〉

齋藤 真司 (株)東芝
岡地 寛季 北海道大学大学院
向高 健一 三菱電機(株)
嶋地 直広 北陽電機(株)
滝島 博史 (有)イーオーアール
伊藤 優佑 三菱電機(株)
椎名 哲男 NEC プラットフォームズ(株)
中村 卓司 国立極地研究所
勝山 杜都 (株)ASTROFLASH
桂川 眞幸 電気通信大学
西橋 政秀 気象庁気象研究所
横藤田 光輝 (株)ユニタック

〈学生会員〉

瀬戸 拓也 九州大学 大久保 洸祐 千葉大学大学院 伊藤 翔 千葉大学大学院 田之上 菜美 東京都立大学大学院 髙田 直輝 東京都立大学大学院 橋本 彩香 電気通信大学大学院 水庭 彰吾 東京都立大学大学院 小林 蒼汰 電気通信大学 瀧上 駿 大阪大学大学院

〈賛助会員〉

なし



<u>退会会員</u> (2021年9月1日から2022年9月2日まで) 正会員 6名 学生会員 8名 賛助会員 1社

〈正会員〉

齊藤 保典 信州大学
 森野 勇 国立環境研究所
 野口 和夫 なし
馬場 洋樹 (株)日本レーザー
五十嵐 保元 (一財)リモート・センシング技術センター
 向高 健一 三菱電機(株)

〈学生会員〉

岡地 寛季 北海道大学大学院工学院 市原 涼太郎 東京都立大学大学院 新井 達也 東京都立大学大学院 KUSWAN ISAM EBISAWA 東京都立大学 本間 大成 東京大学 勝山 杜都 東京大学 岸淵 航大 東京都立大学 瀬戸 拓也 九州大学 (正会員への移行者 2 名を含む)

〈賛助会員〉

(株)アイ・アール・システム



今号では、レーザセンシング学会で委員会を設けて調査を進めている「産業応用ライダー」に焦点を当て た特集が組まれました.当該分野の現状・将来やその基礎理論などについて、第一線で活躍されている諸先 生方に執筆頂きました.また、総括として巻頭言を上記調査委員会の小林委員長に、そして総説を同調査委 員会の平野委員に執筆頂きました.御蔭を持ちまして、今号特集も「豪華・盛り沢山」なラインナップとな りました.緊密なスケジュールにも関わらず執筆して頂きました著者の皆様、そして査読して頂きました関 連研究者の方々のご協力の賜物です.この場を借りて深く御礼申し上げます.最後に、大変嬉しいご報告. 本学会誌において初の「論文」記事が本号にて掲載されました(本号は学会誌が始まって6巻目に当たりま す).投稿頂きました著者方々に厚くお礼申し上げます.皆様からの記事投稿(論文,解説、総説、などな ど)を編集委員会一同お待ちしております!

編集委員会 副委員長 西澤 智明

■編集兼発行人:レーザセンシング学会(http://laser-sensing.jp/)

■企画:レーザセンシング学会編集委員会

石井昌憲 (委員長), 佐藤 篤 (副委員長), 西澤智明 (副委員長), 柴田泰邦 (副委員長), 朝日一平, 境澤大亮, 津田卓雄, 矢吹正教, 杉本幸代, 吉田 智

■連絡先:〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1 気象庁気象研究所 台風・災害気象研究部

第3研究室気付 レーザセンシング学会編集委員会

■電子メール:lrsj-edit_office@laser-sensing.jp