



Abstract

自動運転やロボット・ドローンの話題とともに、周囲環境の三次元情報を取得するセンサであるライダーが注目を浴びている。しかし従来のライダーはメカ式の光偏向器を利用する等の理由から、大形、高コストであり、幅広い応用は困難と考えられる。そこで最近、フラッシュ方式、光フェーズドアレー方式、スローライト方式など、非メカ式のライダーが活発に研究開発されている。本稿ではライダーの方式、性能と原理的な制約、ライダーを構成する各要素への要求などを解説し、非メカ式による切手サイズライダーを実現するためのチャレンジを紹介する。

キーワード：ライダー、シリコンフォトニクス、光フェーズドアレー、スローライト

1. はじめに

ライダー (LiDAR: Light Detection and Ranging) は、測距を行うための光送受信機と光ビームを走査するための光偏向器を組み合わせて、周囲環境を三次元映像化するセンサ装置であり、光レーダとも呼ばれる。ミリ波帯のレーダと同様に、測距の原理として、光パルスの往復時間を計測する飛行時間 (TOF: Time of Flight) 方式、信号光と参照光の間のビート周波数から測距する周波数変調連続波 (FM-CW: Frequency Modulation Continuous Wave) 方式などがある⁽¹⁾。ミリ波を光波に替えて解像度を上げ、物体認識を可能にする点が大きな特長である。

近年、自動車の運転支援や自動運転の話題とともに、その開発が世界的な注目を集めている^{(2)~(4)}。しかし現行のライダーは大形で高価なため、そのまま車載部品として普及させるのは容易ではない。もし性能を維持しつつ、小形で廉価なライダーが実現されれば、この状況を打破できるほか、ロボットやドローン、セキュリティ監視、三次元地図作成、建造物の測量、更には記録、認証、仮想現実、エンターテインメントなどのツールとして幅広く利用されると期待されている。

本稿ではライダーの性能や制約を概観するとともに、シリコン (Si) フォトニクス、光フェーズドアレー、スローライトなど、近年、開発が活発な新しい技術による切手サイズライダーの試みを紹介する。

2. ライダーの性能と制約

ここでは、ライダーの特徴、競合技術との関係、性能項目と原理的な制約、車載等へ応用する上での要求などをまとめる。それらは相互に関連しており、一部、トレードオフの関係にあることを述べる。

(1) 観測できる距離

ライダーは光を物体に向けて送信し、反射戻り光を受信して、その時間や周波数の情報から測距を行う。車載に注目すると、高速走行時を想定して 100~200 m までの対応が求められる。遠方の測距では、既にミリ波レーダが搭載されているが、物体認識までが必要となると、依然としてライダーが必須となる。数 m 以内の近距離については、複眼カメラなどと競合するが、二次元画像からの推測ではなく距離を実測する安心安全という点でライダーはやはり重要である。

ただし物体表面の光の反射率は必ずしも高くなく、また反射光は様々な方角に散乱されるので、ライダーに戻るまでには距離の二乗に反比例してパワー密度が低下する。例えば 100~200 m の距離にある反射率 10% の物体、並びに小さめの受光開口径 3 cm ϕ を仮定したとき、

馬場俊彦 正員 横浜国立大学大学院工学研究院知的構造の創生部門
E-mail baba-toshihiko-zm@ynu.ac.jp
Toshihiko BABA, Member (Faculty of Engineering, Yokohama National University, Yokohama-shi, 240-8501 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.102 No.7 pp.649-653 2019年7月
©電子情報通信学会 2019

光の減衰は 80~90 dB に及ぶ。これに対応するためには、アイセーフ条件を満たす最大出力のレーザ光源と、高感度な検出系が必要になる。

(2) 必要となる送受信機

TOF 方式では光パルスの受信に直接検波が使われるので、(1) で述べた光減衰に対応するために、とにかく高強度（ピーク強度が数十 W 以上）のパルスレーザが必要とされる。このようなハイパワーレーザが実現できる半導体は(In)GaAs 系に限られ、その発光波長の範囲で、太陽光スペクトル成分が小さな波長 900 nm 帯が主に用いられる。これはアイセーフ波長ではないが、パルスのデューティ比を抑制して時間平均パワーを 1 mW 以下に下げ、実効的にアイセーフ条件を満足させる。受信には単一光子計測アバランシダイオード (SPAD: Single Photon Avalanche Diode) 等の特殊な高感度検出器が用いられる。

FM-CW 方式は連続光を使うので、1,500 nm 帯周辺のアイセーフ波長が必須となる。許容されるパワーは 10~100 mW (ビーム掃引の有無に依存) まで引き上げられる。受信には超高感度を実現するコヒーレント検波が用いられるが、光源には発振線幅 1 MHz 以下というコヒーレンスが高い単一波長半導体レーザが必要となる。

(3) 分解能・解像度・速度・視野角

車載で人や車を見分けるためには、人体の厚みや横幅を認識するために、少なくとも 25 cm 以下が一つの解像点として求められる。150 m の遠方を考えたとき、これは光ビームの広がり角 0.1° 以下に対応する。また、この距離を光が往復するだけで $1 \mu\text{s}$ の時間が掛かるので、測距にもこれと同じ時間を掛けると仮定し、ビデオレート 25 fps 以上の速度を実現しようとする、解像点数は 2 万以下に制限される。車の前方の物体を測距する場合、横方向に広角・高解像が求められ、縦方向にはそれらの要求は少ないので、一例として横方向に 400 点、縦方向に 50 点を目安にしてみる。上記のビーム広がり角を考慮すると、視野角は横 $40^\circ \times$ 縦 5° となる。距離が 50 m 以下となれば、同じ対象物を 0.3° 以下のビーム広がり角で解像できるので、同じ解像点数に対して視野角は $120^\circ \times 15^\circ$ となる。

速度と解像点数の制限は、並列化によって解消できる。例えばライン状光ビームを走査し、検出器をアレー化する、単純に複数の送受信機を用意する、といった方法があるが、装置は大形化する。

3. メカ式と非メカ式

従来の多くのライダは、光偏向のために回転ミラーな

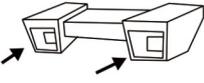
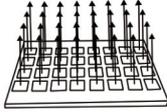
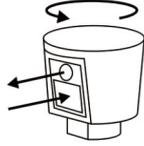
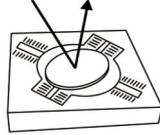
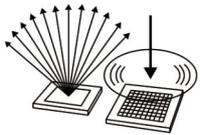
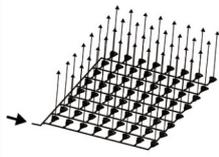
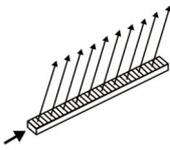
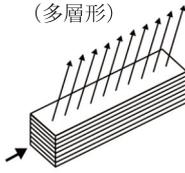
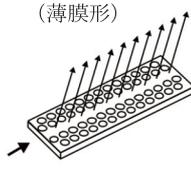
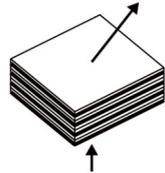
どのメカを利用する。近年、話題となっているライダでは、非メカ式がキーワードとなっている (Solid State LiDAR と呼ばれる)。切手サイズの超小形化、量産による低コスト化、安定動作などが期待されるためである。これを説明するために、競合技術を含めた三次元センサ技術や光偏向器技術を表 1 にまとめる。

既に触れた複眼カメラは視差を利用するので、遠方で距離分解能を得るのが難しい。ミリ波レーダは超解像技術が話題であるが、高解像度で物体を認識する点では、依然としてライダが有利である。メカ式ライダは大形で、高コストなほか、車の振動等に対する不安定性がある。メカ式と非メカ式の間にあるのがマイクロマシン (MEMS: Micro Electromechanical System) ミラーである。一種のメカ式ではあるが、Si プロセスを用いて製作するので、純粋なメカ式に比べると小形化と量産に適しており、一部は既に実用化されている。ただしミラーが小さ過ぎると光の広がり角が大きくなり、ミラーを大きくすると高速では動かないというトレードオフがある。そこで小さなミラーにビームを平行化する光学系を加える方法が採られるが、そうすると偏向角や解像点数に制限が出てくる。

以上の理由から、純粋な非メカ式への期待が高まっている。しかし様々な技術的チャレンジがある。既に三次元映像が得られているものにフラッシュライダがある。ここでは送信時のパルス光をビーム状にせず、ストロボライトのように拡散させ、反射光を高速なイメージセンサで撮像する。イメージセンサに映る物体の距離ごとに反射光が戻る時刻が変わるので、映像から距離ごとの画像を生成し、三次元映像に変換する。光偏向自体がないので、パルスレーザ、光学系、イメージセンサのみという単純な構成が魅力である。一方で最初から光を拡散させる分、反射光は一層微弱になる。太陽光のような環境雑音が多い環境で遠方を観測するには桁違いに大出力のレーザが要求される。近距離ではこの問題は軽減されるが、近距離は上述のような既存のセンサが競合するほか、より細かい距離分解能が要求されるので、イメージセンサの高速化が必要になる。

フラッシュライダ以外の方式は、非メカ式光偏向器を用いる。これを実現するために光の屈折、回折、干渉などと、材料屈折率や光の波長の変化を組み合わせる手法が研究されてきた。材料屈折率の変化には、光学結晶や液晶における電気光学効果、圧電材料における音響光学効果、半導体材料等による熱光学効果などが用いられるが、いずれも屈折率変化が $0.001 \sim 0.01$ と小さく、数度程度の偏向角しか得られない。このような状況を打破するには、同じ屈折率や波長の変化に対して、偏向角を増幅する構造的な工夫が必要になる。液晶を多層に重ねて屈折回数を増したり、後述するスローライト効果⁵⁾を用いたりするのがこれに当たる。

表1 様々な三次元センサと次世代ライダー用非メカ式光偏向器

| | | | | | |
|---------------|--|--|---|---|--|
| 三次元センサ |  <p>複眼カメラ</p> |  <p>超解像ミリ波レーダ</p> |  <p>メカ式ライダー</p> |  <p>MEMSライダー</p> |  <p>フラッシュライダー</p> |
| 利点 | 既に実用化 高解像度が可能 | 実用化技術の延長 | 既に実用化 高解像度 | 既に実用化 量産しやすい | 構成が単純 完全な非メカ式 |
| 課題 | 距離分解能が低い 製造が難しい | ライダーに比べて やはり低解像度 | 大形・高コスト 振動に弱い | 分解能, 速度, 偏向角 にトレードオフ | 短距離・屋内限定か 高出力光源が必要 |
| ライダー用非メカ式光偏向器 |  <p>光フェーズドアレー</p> |  <p>導波路回折格子</p> |  <p>スローライト (多層形)</p> |  <p>スローライト (薄膜形)</p> |  <p>多層液晶</p> |
| 利点 | 電気制御で自由 な光偏向が可能 | 古典的, 成熟 高解像光ビーム | 高解像度 高出力可能 | 高解像度 受信系も光集積 | 高解像度 高出力可能 |
| 課題 | 低損失化 高解像度化 | 偏向角の拡大 | 受信系との組合せ | 低損失化 ライダー実証 | 高電圧が必要 温度依存性 |

もう一つの非メカ式光偏向器として、米国で開発が盛んなのが光フェーズドアレー (OPA: Optical Phased Array) である⁽⁶⁾。OPAは整列された多数の光放射器に光を分配し、各放射器の光の位相を調整して相互干渉させることで、所望の光ビームを合成する。理想的には鋭い光ビームと任意の偏向角や二次元偏向を実現するが、これには膨大な数 (一次元では必要な解像点数の半分の数, 二次元では1/4) の光放射器と、全ての放射器に対する複雑かつ精密な位相調整が必要となる。既報告の最大規模のOPAは光放射器の数が $32 \times 32 = 1,024$ 個である⁽⁷⁾。これでも相当な数ではあるが、それでも解像点数の限界は 64×64 なので、様々な応用のためには不足する。加えて、光を分配する際の累積損失や、熱光学効果を使った位相調整のための電力の低減も課題である。これを避けるため、OPAは一次元方向にとどめて要求を軽減し、直交する方向には回折格子と波長掃引を組み合わせる折衷案が検討され、三次元ライダー画像も示されている⁽⁸⁾。

4. スローライト光偏向器

光学理論によれば、光パルスの速度=群速度は $(dk/d\omega)^{-1}$ で与えられる。つまり低群速度を示すスローライトは $dk/d\omega$ が大きい⁽⁵⁾。これは、光の周波数 ω (ある

いは波長 λ と言い換えてもよい) の僅かな変化に対して光の波数 k が大きく変わることを意味する。このようなスローライトは、半導体多層構造を有する導波路 (多層形) や、円孔の周期配列を含む薄膜スラブで構成されるフォトニック結晶導波路 (薄膜形) により発生させることができる。これらの構造に、スローライトをゆっくりと放射させる構造を加えると、角度広がり角が 0.1° 以下のビームが形成される。例えば多層形の場合、上側の多層膜の数を適度に減らして、光を上方向に漏らす⁽⁹⁾。薄膜形の場合、円孔配列の2倍の周期を持つ回折格子を付加する⁽¹⁰⁾。光が放射される時、ビームの角度はスローライトの波数 k により決定される。したがって前記のスローライトの性質から、波長の変化に対する偏向角が増幅される。同様の偏向角の増幅は、導波路の屈折率変化に対しても生じる。このようなスローライト効果は導波路の設計や波長の設定で任意に大きくできるが、構造揺らぎに対するビームの乱れも増幅してしまうという制限がある。つまり製作精度との兼ね合いになるが、現状、ビーム広がり角 0.1° 以下が維持される範囲では、回折格子に比べて7~10倍の偏向角が得られる。また、導波路への光の入射方向を切り換えることで、プラスの角度からマイナスの角度まで偏向角を2倍に拡大できる。導波路に沿った一次元方向では既に偏向角 40° 以上、解像点数1,000以上が実現される。

このような特長に加え、多層形では、同様の半導体構造を持つ垂直共振器形面発光レーザ（VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser）と集積ができるので、同レーザを可変波長タイプにすることで、光ビーム偏向レーザとなる。また、スローライト導波路自体にも電流注入を行って、光を増幅することもできる。エピタキシャル成長された(In)GaAs/AlGaAs系半導体多層膜にこのような素子が製作され、10 W 近い高出力が得られるので、TOF ライダに最適である⁽¹¹⁾。一方、薄膜形は波長 1,500 nm 帯で動作する Si フォトニクス技術により製作される。Si フォトニクスは電子回路と同様の CMOS プロセスを用いるので、直径 200~300 mm のウェーハに最小寸法 150 nm 以下で光部品を高密度集積し、大量生産することが可能である。これを用いれば、多数のスローライト導波路や関連する光回路を組み合わせ、通常の光偏向だけでなく、波長多重による並列

化⁽¹²⁾や、FM-CW 方式のような複雑な検出系⁽¹³⁾を簡単に実現することができる。

図 1 は 32 本の薄膜形スローライト導波路を光スイッチアレーとともに集積した例である⁽¹⁴⁾。この素子の上部にコリメートレンズを配置すると、1 本の導波路から放射された光はスポット状のビームになる。スイッチにより導波路を切り換えると、レンズに対してオフセットされた位置から光が出てくるようになるので、レンズで光が屈曲し、導波路に直交する方向（図中の縦方向）に光が偏向される。つまり、前述の導波路に沿った方向（横方向）の偏向と組み合わせた二次元光偏向が可能になる⁽¹⁵⁾。図 2 は導波路への光の入射方向も切り換えて光ビームを二次元偏向した様子である。横・縦両方向に離散的なスポットを重ねて図示しているが、実際は横方向に連続的な偏向が可能であり、多少のビーム変形を無視すると、400×32 で、合計 12,800 の解像点が見積もられた。

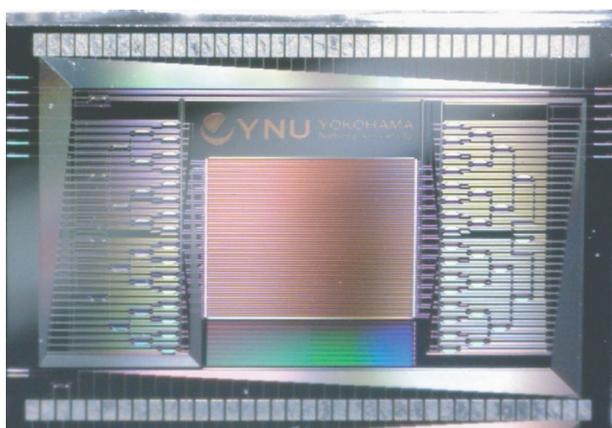


図 1 Si フォトニクスを用いて製作したスローライト光偏向器 中央が光放射部。

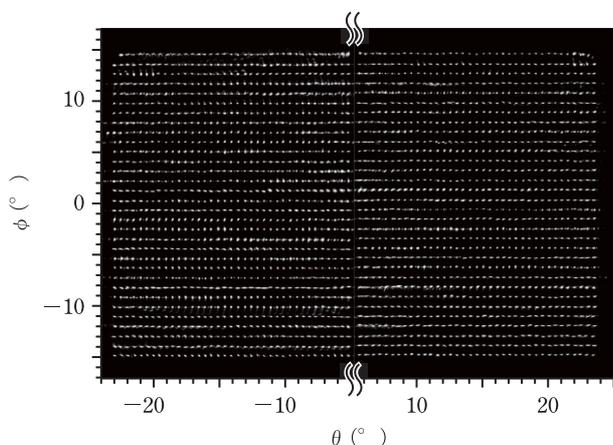


図 2 スローライト光偏向器により横方向（角度 θ ）、縦方向（角度 ϕ ）に二次元偏向された光ビーム レンズ位置を微調整している。

5. FM-CW 方式による測距

2. で述べたように、FM-CW 方式では、特殊な検出器を使わなくても、極限的な高感度が得られる。ここでは、周波数変調した連続光を物体に当て、同様に変調した参照光と反射戻り光をライダ内部で光学的にミクシングした上で、バランス形フォトダイオードによりコヒーレント検波する。この際、参照光と反射光の間には距離に応じた周波数差があるので、ミクシングによって発生するビート周波数を計測すれば測距できる。フォトダイオードで発生する信号電流は、直接検波では光強度に比例するのに対し、コヒーレント検波では光強度の平方根に比例する。また参照光を強くすることで、信号を増幅することもできる。よってフォトダイオードや電子回路の熱雑音の影響を受けず、理想的にはショット雑音限界までの微弱光を検出できるという点で圧倒的に有利である。また、物体が近づいたり遠ざかったりすると、その速度に応じて反射光の周波数にドップラーシフトが加わるので、物体の位置だけでなく、速度も計測できるので、車など移動体の動きの予測に役立つ。また、このような機能は風の動きを検知する大形ライダとして研究開発されてきた経緯がある。空気の動きが手軽に可視化できれば、最初に述べた応用とは別の可能性も広がるかもしれない。

既に Si フォトニクス技術で集積化した周波数変調器と薄膜形スローライト導波路光偏向器を集積し、光偏向器からの 10 mW 以上の光出力、並びに同偏向器を介した光の送受信や、模擬的な遅延距離に応じたビート信号が確認されている⁽¹²⁾。

6. む す び

非メカ式ライダーについて、米国では、Si フォトニクスに関する AIM Photonics プロジェクトや、光フェーズドアレーに関わる DARPA プロジェクトが主要テーマとして採り上げており、合わせて数百億円規模の資金を投入し、開発を推進している。また多くのベンチャーが起業して、フラッシュライダーや光フェーズドアレーの実用化にチャレンジしている。(メカ式ライダーも含めれば、40社と言われる。) スローライトライダーはこれらの競争技術が抱える課題を回避し、量産に適する形で、非メカ式ライダーの実現を狙っている。今後、可能な限りのチップ集積とライダー動作を計画しており、実用化に向けた産学連携にも期待したい。

なお、ここに紹介した2種類のスローライト導波路光偏向器とそのライダー応用については、科学技術振興機構(JST) ACCEL プロジェクトにより開発が進められている。

文 献

- (1) 吉田 孝 (監修), 改訂レーダ技術, 電子情報通信学会, 東京, 2014.
- (2) I. Puente, H. Gonzalez-Jorge, J. Martinez-Sanchez, and P. Arias, "Review of mobile mapping and surveying technologies," *Measurement*, vol. 46, no. 7, pp. 2127-2145, Aug. 2013.
- (3) 松元則雄, "LiDAR, 価格破壊," *日経エレクトロニクス*, no. 1176, pp. 49-61, Feb. 2017.
- (4) 三宅常之, 松元則雄, "車載センサー三国志," *日経エレクトロニクス*, no. 1189, pp. 20-36, March 2018.
- (5) T. Baba, "Slow light in photonic crystals," *Nature Photonics*, vol. 2, no. 8, pp. 465-473, Aug. 2008.
- (6) J. Sun, E. Timurdogan, A. Yaacobi, E.S. Hosseini, and M.R. Watts, "Large-scale nanophotonic phased array," *Nature*, vol. 493, pp. 195-199, Jan. 2013.
- (7) H. Abediasl and H. Hashemi, "Monolithic optical phased-array transceiver in a standard SOI CMOS process," *Opt. Express*, vol. 23,

no. 5, pp. 6509-6519, March 2015.

- (8) C.V. Poulton, A. Yaacobi, D.B. Cole, M.J. Byrd, M. Raval, D. Vermeulen, and M.R. Watts, "Coherent solidstate LIDAR with silicon photonic optical phased arrays," *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 20, pp. 4091-4094, Dec. 2017.
- (9) X. Gu, T. Shimada, A. Fuchida, A. Matsutani, A. Imamura, and F. Koyama, "Beam steering in GaInAs/GaAs slow-light Bragg reflector waveguide amplifier," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, no. 21, pp. 211107 (1-3), Nov. 2011.
- (10) K. Kondo, T. Tatebe, S. Hachuda, H. Abe, F. Koyama, and T. Baba, "Fan beam steering device using a photonic crystal slow-light waveguide with surface diffraction grating," *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 23, pp. 4990-4993, Nov. 2017.
- (11) Z. Ho, J. Hayakawa, K. Shimura, K. Kondo, X. Gu, A. Matsutani, A. Murakami, and F. Koyama, "High power and high beam quality amplifier," *Int. Semicon. Lasor Conf.*, no. WC3, pp. 229-230, Sept. 2018.
- (12) H. Ito, T. Tatebe, H. Abe, and T. Baba, "Wavelength-division multiplexing Si photonic crystal beam steering device for high throughput parallel sensing," *Opt. Express*, vol. 26, no. 20, pp. 26145-26155, Sept. 2018.
- (13) Y. Furukado, H. Abe, Y. Hinakura, and T. Baba, "Experimental simulation of ranging action using Si photonic crystal modulator and optical antenna," *Opt. Express*, vol. 26, no. 14, pp. 18222-18229, June 2018.
- (14) 伊藤寛之, 楠 侑真, 秋山大地, 阿部紘士, 竹内悟朗, 馬場俊彦, "Si フォトニック結晶スローライト光偏向器の大規模な二次元光偏向," 応用物理学会秋季講演会, no. 19a-225B-3, Sept. 2018.
- (15) H. Abe, M. Takeuchi, G. Takeuchi, H. Ito, T. Yokokawa, K. Kondo, Y. Furukado, and T. Baba, "Two-dimensional beam-steering device using a doubly periodic Si photonic-crystal waveguide," *Opt. Express*, vol. 26, no. 8, pp. 9389-9397, April 2018.

(2019年1月31日受付 2019年2月5日最終受付)



馬場 俊彦 (正員)

昭60 横浜国大・工・電気卒。平2 同大学院博士課程了。同年東工大・助手。平6 横浜国大・助教授, 平17 同教授。フォトニック結晶, シリコンフォトニクス, 微小レーザ, スローライト等を研究。工博。平18 日本学術振興会賞, 平24 市村学術賞, 平28 文部科学大臣表彰科学技術賞など各受賞。