

二次元走査型LRF

=LRFの測定原理及び走査光学系の方式=

エーエルティー㈱ 河村 達也

1. はじめに

LRF (Laser Range Finder) とはレーザ光を用いた測距装置のことである。同様に距離を測定するものにLIDAR (Light Detection And Ranging) があるが概ね計測レンジが100 m以下の近距離用をLRF、それ以上の遠距離用はLIDARと呼ばれている。

LRF単体では奥行き方向の一次元情報のみであるが、ポリゴンスキャナやガルバノスキャナ、光MEMS等の光走査装置と組み合わせることで広範囲を高速に三次元計測可能である。

近年、これらの装置はロボットや無人搬送車のような自立移動体の視覚センサとしてや自動車の衝突防止装置、進入監視などのセキュリティシステム等、様々な分野に応用されている。本稿ではLRF (LIDAR) について測定原理及び二次元走査する際の走査光学系、光偏向器について述べる。

2. 測定方式

LRFの代表的な測定方式としては、TOF方式、AM変調方式、FM-CW方式の3種類がある。以下に各々の原理、特徴について説明する。

2-1 TOF (Time Of Flight) 方式

パルス発光させたレーザ光を対象物に照射し、反射して戻ってくるまでの飛行時間から距離を求める手法である。対象物までの距離 L は、光速を c 、レーザ光を発射し戻ってくるまでの飛行時間を Δt とすると式(1)で表される。

$$L = \frac{c\Delta t}{2} \quad \dots(1)$$

L : 対象物までの距離 (m)

c : 光速 (3×10^8) (m/s)

Δt : 飛行時間 (s)

TOF方式の特徴としては、パルス幅の短いレーザ光を測定に使用しているため安全規格IEC 60825-1で定められているクラス1を超えない範囲においても、1パルス当りの発光強度を高くすることができるためより長距離の計測が可能となっている。クラス1とは人体に影響を与えない低出力なもので目に安全であり、どのような条件下でも最大許容露出光量 (MPE) を超えないレベルのことである。

しかしながら計測ポイントは信号の立上がり部分にしかなく、ごく短い時間を測定しなければならない。このため測定精度は広帯域アンプ、演算回路の速度、精度に大きく依存し、より高精度な距離測定を行うには高価な部材が必要となってくる。

仮にサンプリング周波数が1 GHzの場合、サンプリング時間は1 nsとなり、この間に光は往復で300 mm移動するのでこのときの分解能は150 mmとなる。逆に分解能10 mmとした場合、サンプリング速度は15 GSPS必要となり技術的にも難しくなってくる。1パルス当りの発光強度を高くできる点や測定分解能の点からより長距離での使用に有利な方式と言える。

2-2 AM変調 (Amplitude Modulation) 方式

正弦波状の強度変調をかけたCWレーザ光を対象物に照射し、反射して戻ってきた光と参照光との位相差から距離を求める手法である。AM変調方式での対象物までの距離 L は、位相差を $\Delta\phi$ 、変調周波数を f とする

と式(2)で表される。

$$L = \frac{c\Delta\phi}{4\pi f} \quad \dots(2)$$

L : 対象物までの距離 (m)

c : 光速 (3×10^8) (m/s)

$\Delta\phi$: 位相差 (-)

f : 変調周波数 (Hz)

式(2)より変調周波数 f を上げることにより距離変化 ΔL に対する位相差 $\Delta\phi$ が大きくなり測定精度が向上することが分かる。

AM変調方式ではTOF方式と比べ低いサンプリング周波数を用いて高精度な測定ができるため比較的な安価な部品で構成できる。また計測ポイントを多く取れるため計測点数を N とすると \sqrt{N} 倍で S/N を向上させることができる。

1種類の変調周波数を用いた場合、位相遅れが変調周波数の1周期を越えたと前の周期と判別不能となり正確な距離が測定できなくなるため、距離と精度を両立させるために2種類以上の周波数を用いる。1周期を越え位相差 $\Delta\phi$ が0となるのは対象物までの距離 L が $c/2f$ の倍数になったときである。仮に変調周波数を100 MHzとすると位相差が0となり計測不能となる距離 L は1.5 mとなる。また変調周波数を3 MHzとすると計測不能となる距離 L は50 mである。変調周波数としてこの2つの周波数を組み合わせることで計測不能となる距離はそれらの最小公倍数となり、この場合150 mまで計測距離を伸ばすことが可能となり測定精度は周波数の高い100 MHzの信号により決定される。

2-3 FM-CW (frequency Modulated Continuous Wave) 方式

のこぎり波状の周波数変調をかけたCWレーザー光を対象物に照射し、参照光と反射光の周波数差(ビート周波数)から距離を求める手法である。図1は参照光を基準にしたとき、遅れ時間 $2L/c$ で干渉した反射光と参照光の関係である。

FM-CW方式での対象物までの距離 L は、変調周期を T 、ビート周波数を f_b 、周波数掃引幅を Δf とすると式(3)で表される。

$$L = \frac{cTf_b}{2\Delta f} \quad \dots(3)$$

L : 対象物までの距離 (m)

c : 光速 (3×10^8) (m/s)

T : 変調周期 (s)

f_b : ビート周波数 (Hz)

Δf : 周波数掃引幅 (Hz)

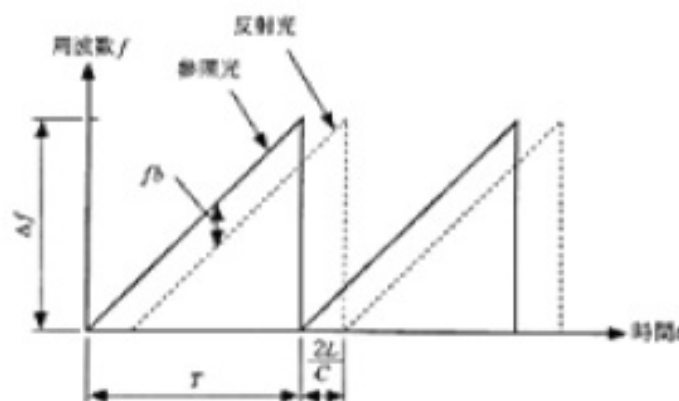


図1 FM-CW法における参照光と反射光の関係

FM-CW方式は測長パラメータに周波数値を利用することで外乱ノイズの影響を受けにくいという特徴があり、計測に必要な受光レベルを抑えられ、反射率の低い対象物でも高精度な測長が可能である¹⁾。

3. 走査光学系方式

LRFの実際の応用に関しては1方向のみの距離測定だけではなく空間を三次元的に捉え、より高次の情報を得る要求が多くなっている。三次元的に捉えるためにはレーザー光を二次元走査する必要があり、また走査方向に視野を持ち受光素子に光を導かなくてはならない。走査型LRFの光学系としては大きく分けて下記3つの方式がある。

3-1 投受光同軸走査

投光軸と受光軸をビームスプリッターなどで同軸とし、1つの光偏光器で走査する方式である。同軸にする方法はこのほかにもカセグレン光学系の副鏡位置に小型ミラーを置き同軸にする方法や、受光レンズ前に投光光学系を直接設置する方法などがある。

メリットとしては投受光方向が常に一致しているため、ビームサイズに合わせ視野を絞ることができ、受光素子に入射する外乱光を最小限に抑えることが可能である。

3-2 投受光非同軸走査

投光軸と受光軸を独立した光偏光器で走査する方式である。同軸走査では受光光学系の前にミラー等を設置するため受光光量に損失があった。非同軸ではその損失はなく同じ受光光量とした場合、受光口径を小さくでき、光偏光器のミラーもより高速に動作できる。

しかし、投受光視野を一致させるためには双方の光偏光器を高精度に同期させ駆動させる必要があり要求仕様によっては難しい場合もある。

3-3 投光走査、受光固定

投光側のみ走査し受光側は固定の光学系で構成された方式である。受光光学系は投光側走査範囲と同等の視野を持ち対象物からの反射光を受光素子に集光する。受光素子としては逆バイアスを印加することにより光電流が増倍される高速・高感度のAPD (Avalanche Photodiode) がよく使われる。より高速な応答が必要であるため受光面サイズは大きくはとれずφ0.5 mm程度のもを使用することが多い。このような受光面が小さい素子1つに対して視野範囲を大きくとることは難しく、狭視野の光学系を扇形に配置し視野範囲を確保する方法や広視野の光学系にAPDアレイを使用する方法などがある。他の方式と比べ常に光学系は広い視野を持つため外乱光の影響を大きく受けるが、投光走査角度に合わせAPDのチャンネルを切替えることで対応している。また、外乱光の影響を減らすために通常BPF (Band Pass Filter) が用いられるが、受光固定式の場合、反射光は垂直入射だけではなく投光走査角度に応じた角度でBPFに入射する。BPFは入射角度に応じて透過波長帯が短波長側にシフトするため、狭帯域のBPFが設定できなく外乱光の影響を受けやすくなる。この方式のメリットとしては光偏光器のミラーサイズに依存せず受光口径を比較的大きく取れる点があげられる。

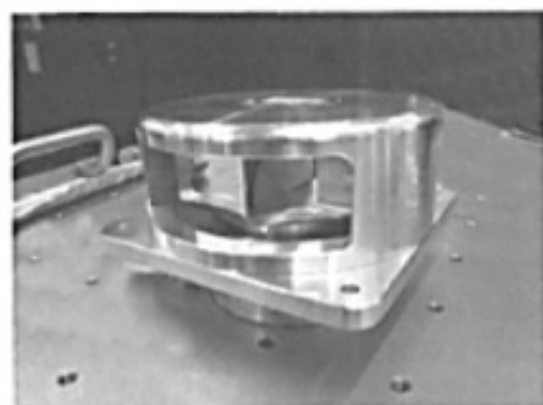


写真1 ポリゴンスキャナ

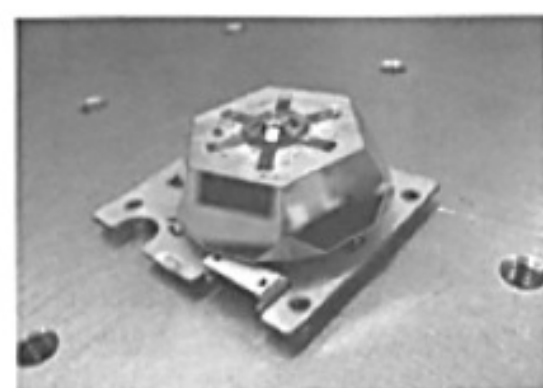


写真2 傾斜ポリゴン
傾斜角度が各々異なる6面ポリゴンミラー

4. 光偏光器

ミラーを使用した光偏光器として代表的なものにはポリゴンスキャナ、ガルバノメータスキャナ、光MEMSスキャナがある。以下にこれら光偏光器の特徴について説明する。

4-1 ポリゴンスキャナ

ポリゴンスキャナは多面鏡を連続的に回転させ光を走査する光偏光器である。

ミラー面数を増やし回転数を上げることで走査周波数は大きくなるが、最大偏光角は小さくなる。一定速度の高速走査に適しているため二次元のラスタースキャンを行う場合は高速軸にポリゴンスキャナを使用し、低速軸をガルバノメータスキャナにする場合が多い。

走査範囲をより広くするためにモノゴン (1面鏡) を使用する場合もある。モノゴンの場合はレーザ光をミラーの回転軸方向 (垂直方向) から入れ水平方向に走査するため原理的には360°走査可能である。

また多面多角度の傾斜ポリゴンを使用することで擬似的に二次元走査を行う方式もある。但しこの場合、走査線の本数はミラー面数に限られる。

4-2 ガルバノメータスキャナ

可動コイルの軸にミラーを取付けた構造となっている。この磁界中にある可動コイルに電流を流すことで電磁力を発生させ、電流に応じたトルクが得られることを利用しミラーの回転角度を制御している。非共振型であるため数Hzといった低速走査も可能で、正弦波以外の信号で駆動させたり任意の位置に停止させたりすることもできる。

二次元走査を行う場合は通常2軸を使用しなければならず装置が大きくなるという欠点があるが、近年では1枚のミラーに2軸を設けたコンパクトな非共振型の二次元走査型アクチュエータの開発も行われている²⁾。

4-3 光MEMSスキャナ

MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術で製作された光偏光器である。通常は半導体プロセスで製造され、単結晶シリコンからエッチングによりミラー、トーションバー、保持枠を一体加工しているため、弾性疲労がなく機械スキャナであっても長時間の寿命を確保することができる。また構造として共振を利用しているものが多いので省電力が図れるメリット

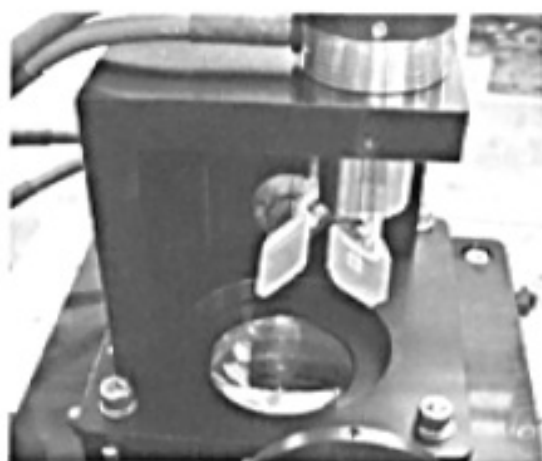


写真3 ガルバノスキャナ

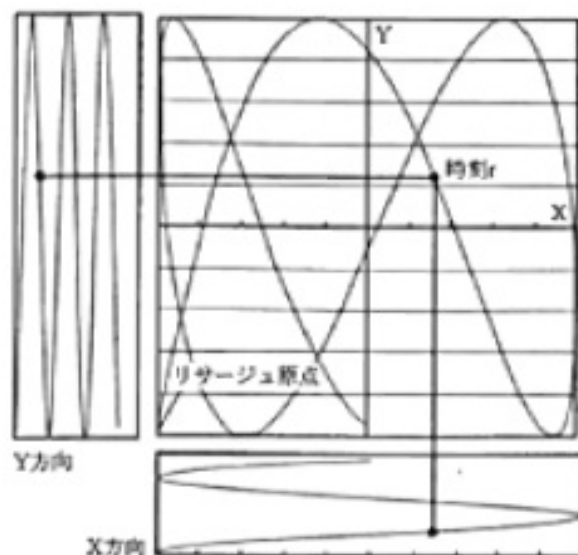


図2 ECOSCANの走査位置⁹⁾

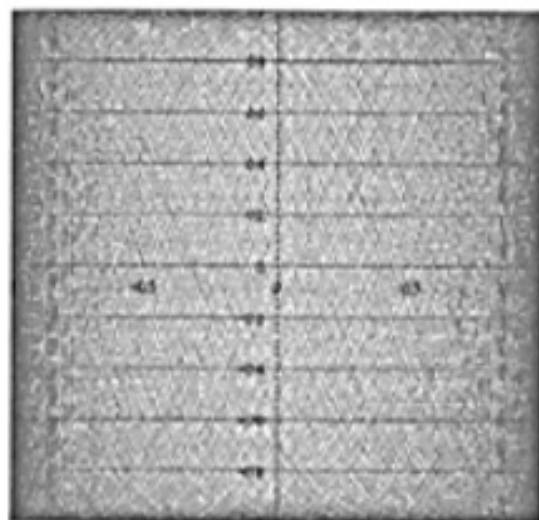


図3 リサーチ走査の軌跡⁹⁾

がある¹⁰⁾。駆動方式としては電磁型、静電型、ピエゾ型がある。それぞれの方式において二次元タイプも開発されており小型軽量化に貢献している。二次元走査を2軸共に共振型スキャナを用いる場合、水平方向と垂直方向の共振周波数を変えることで図2、図3のようなリサーチ走査を行い各走査角における距離計測を実現している¹⁰⁾。

5. おわりに

本稿ではLRF (LIDAR) について測定原理及び二次元走査する際の走査方式、光偏光器について説明した。現在では様々な分野でLRF装置が使用されまた活躍しているが、今後、光MEMSのような新しいデバイスと共に益々計測技術が発展することを期待したい。

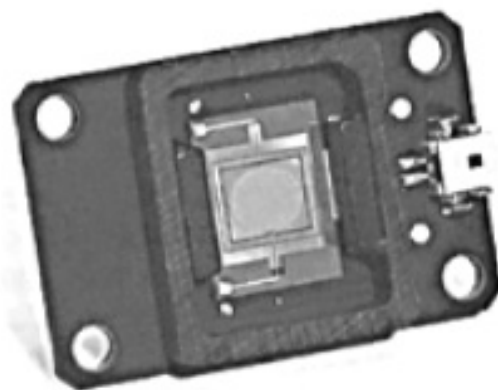


写真4 光MEMSスキャナ¹⁰⁾

＜参考文献＞

- (1) 石岡昌人・柴林志道典：反射ターゲットを用いない高精度レーザー測長技術、三菱重工技報、Vol.38、No.5、274 (2001)
- (2) 山田真人・山口光隆・前納良昭・市原秀一：非共振型二次元光走査用アクチュエータの開発、電子情報通信学会、C-5-2 (2010)
- (3) 高野裕：光MEMSスキャナの計測、生産化に向けて生産工程でのアプローチ、光プライアンス、Vol.23、No.1、50 (2012.1)
- (4) ECOSCAN、距離画像センサ、<http://www.ecoscan.jp>、日本語版

【筆者紹介】

河村達也

エーエルティー㈱ 開発部
〒176-0014 東京都練馬区豊玉南1-21-10
TEL: 03-5946-7336 FAX: 03-5946-7316
E-mail: tkawamura@aitec.co.jp