

光応用計測

神戸高専 AE1 r209211

野瀬田 裕樹

2009年9月7日(月)

1 定期試験の範囲と出題形式

定期試験の範囲と出題形式は以下の通りである。

- ① (長さ, 距離の測定 1) : レーダ方式.....虫食い, 式
- ② (長さ, 距離の測定 2) : 変調法.....式変形 (導出), 合致法の計算問題
- ③ (長さ, 距離の測定 3) : 干渉法..... * 1 の式変形 (導出)
- ④ (長さ, 距離の測定 4) : フォトニックセンサ.....虫食い
- ⑤ (長さ, 距離の測定 5) : 三角測量法.....図 2-30 を用いて式を導出
- ⑥ (長さ, 距離の測定 6) : 別紙 (ピントの合わせ方).....虫食い
- ⑦ (速度測定, 回転速度測定) : ドップラー法.....図 3-1 を描く, 流速測定虫食い
- ⑧ (光ファイバ応用計測) : 特徴.....虫食い

目次

1	定期試験の範囲と出題形式	1
2	長さ, 距離の測定	2
2.1	レーダ方式	2
2.2	変調法	3
2.3	干渉法	5
2.4	フォトニックセンサ	6
2.5	三角測量法	7
2.6	別紙: ピントの合わせ方	8
3	速度測定, 回転速度測定	9
3.1	ドップラー法	9
4	光ファイバ応用計測	10
4.1	特徴	10

2 長さ，距離の測定

2.1 レーダ方式

レーダ方式は，パルス状の光を送り，それが測定対象から反射されて返ってくるまでの時間 τ を測定することにより，対象までの距離 L を求めるものである．

今，光の真空中での速度を c_0 とし，光路に沿った屈折率の平均値を $\langle n \rangle$ とすると，

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{\text{往復距離 } (2L)}{\text{速度 } c_0 / \langle n \rangle} \\ &= 2L \frac{\langle n \rangle}{c_0} \end{aligned} \quad (2.1)$$

したがって，

$$L = \frac{c_0 \tau}{2 \langle n \rangle} \quad (2.2)$$

$$= \frac{c \tau}{2} \quad (2.3)$$

として L が求められる．($\langle n \rangle$: ブラケット n , $c = c_0 / \langle n \rangle$)

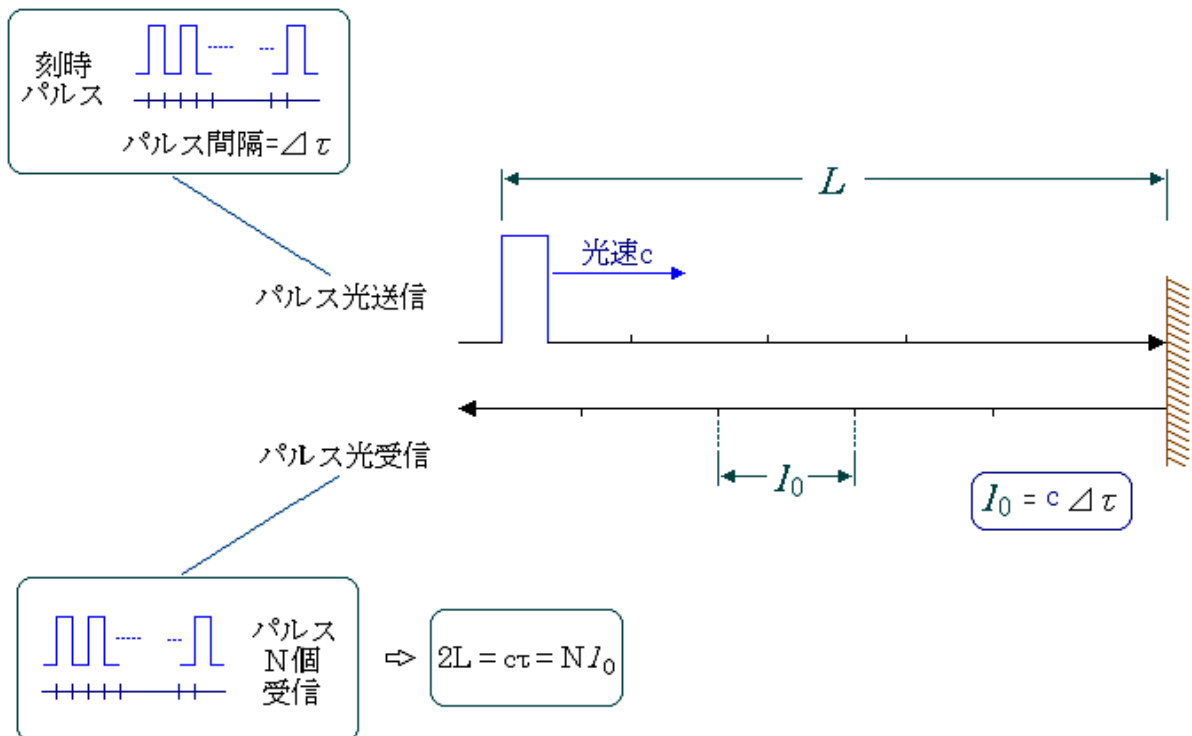


図1 レーダ方式の原理

2.2 変調法

送信光強度を $I_T(t)$ とし、反射光強度を $I_R(t)$ とする。光が対象までの距離 L を往復するのに要した時間を τ とすると、

$$I_R(t) = a \cdot I_T(t - \tau) \quad (2.4)$$

と表せる。(ここで、 a は減衰を表す係数である)

送信に正弦波変調を用いれば、変調された送信波は、

$$I_T(t) = I_0(1 + m \sin \Omega t) \quad (2.5)$$

と表され (m は変調度を表し、 $0 \leq m \leq 1$ である)、受信される反射波は

$$I_R(t) = aI_0\{1 + m \sin \Omega(t - \tau)\} \quad (2.6)$$

となる。ここで、 $\Omega = 2\pi/T$ で、 T は既知であるから Ω も既知である。

受信波を同時検波して、($\overline{\quad}$ で時間平均を表す)

$$\begin{aligned} \overline{I_R(t) \cdot \sin \Omega t} &= \overline{aI_0\{1 + m \sin \Omega(t - \tau)\} \cdot \sin \Omega t} \\ &= aI_0 \overline{\{\sin \Omega t + m \sin \Omega(t - \tau) \cdot \sin \Omega t\}} \\ &= aI_0 [\overline{\sin \Omega t} + (m/2) \{\overline{\cos(\Omega\tau) - \cos(2\Omega t - \Omega\tau)}\}] \\ &= \frac{aI_0 m}{2} \cos \Omega\tau \end{aligned} \quad (2.7)$$

として、受信波から位相差 $\Omega\tau$ が求まる。これより、 τ が求まれば、距離 L は

$$L = \frac{c\tau}{2} \quad (2.8)$$

として求めることができる。

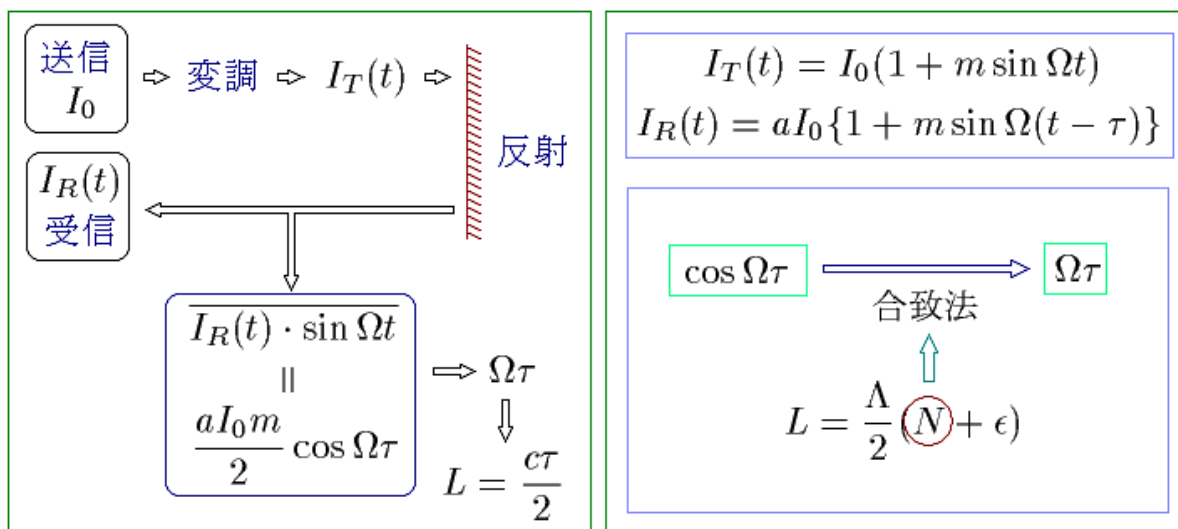


図2 変調法

＜合致法＞

距離 L は, Λ を変調波の波長として

$$L = \frac{c(N + \epsilon)T}{2} = \frac{\Lambda}{2}(N + \epsilon) \quad (2.9)$$

で与えられるが, N を定めることができない. そこで, 合致法を用いて N を推定する.

合致法とは, 変調波長 Λ を変えながら, 位相 $\epsilon_i T$ を測定して, N を決定する方法である.

(N を決定するには, 距離 L の概略値 L_0 が必要)

まず, 距離 L 及び L_0 を波長 Λ_i を用いて式で表すと以下のようなになる.

$$\begin{cases} L = \frac{\Lambda_i}{2}(N_i + \epsilon_i) \\ L_0 = \frac{\Lambda_i}{2}(N_{0i} + \epsilon_{0i}) \end{cases} \quad (2.10)$$

このとき, N_{0i} は整数, ϵ_{0i} は端数であるが, Λ_i が定まれば両者とも計算で求めることができる.

$$\Delta L = L - L_0 = \frac{\Lambda_i}{2}\{(N_i - N_{0i}) + (\epsilon_i - \epsilon_{0i})\} \quad (2.11)$$

ここで, $\epsilon_i - \epsilon_{0i}$ は測定値 $\epsilon_i T$ から算出でき, ΔL が一般に小さいことから $N_i - N_{0i}$ も小さい整数である. いくつかの波長 Λ_i について $N_i - N_{0i} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ のおのおのに対して ΔL を求めれば, 各波長に共通する値が見出されるはずである. それが求める ΔL であり, L_0 は既知であるから, $L = L_0 + \Delta L$ として L も決定できることになる.

すなわち, 以下の手順によって距離 L を決定できる.

- ① 概略値 L_0 が分かっているものとし, これから計算によって N_{0i}, ϵ_{0i} は求まる.
 N_{0i} は整数, ϵ_{0i} は端数であり, 波長 Λ_i を L_0 の式に代入すると求まる.
- ② 波長 Λ_i で変調し, 光を送信する.
- ③ 位相 $\epsilon_i T$ を測定し, ϵ_i を求める.
- ④ これにより, 必要な変数 ($L_0, N_{0i}, \epsilon_{0i}, \Lambda_i, \epsilon_i$) の値が求まる.
- ⑤ 各波長 Λ_i に共通な ΔL が見つければ, それを用いて L を決定することができる.

＜例題＞

距離 $L = 50.28\text{m}$ を変調法によって測定する. 変調周波数 $\Lambda_1 = 1\text{GHz}$, $\Lambda_2 = 1.2\text{GHz}$ の2周波を用いる. また, 概略の距離 $L_0 = 50\text{m}$ が知られているものとして, 下記の表の値を導出した. 合致法を用いて ΔL を計算し, 距離 L を決定せよ.

	変調周波数 (GHz)	$\Lambda_i(m)$	(N_i)	N_{0i}	ϵ_i	ϵ_{0i}	$\epsilon_i - \epsilon_{0i}$
$i = 1$	1	0.3	(335)	333	0.2	0.333	-0.133
$i = 2$	1.2	0.25	(402)	400	0.24	0	0.24

ヒント① 値が一定である $\frac{\Lambda_i}{2}(\epsilon_i - \epsilon_{0i})$ を先に求めておく.

ヒント② 整数値 $N_i - N_{0i}$ を変えながら ΔL (すなわち, $\frac{\Lambda_i}{2}(N_i - N_{0i})$) を計算する.

ヒント③ $i = 1$ と $i = 2$ において ΔL が同じ値となる $N_i - N_{0i}$ を調べる.

ヒント④ 同じ値となった $N_i - N_{0i}$ のときの ΔL を用いて距離 L を決定する.

2.3 干渉法

光の振幅 (A_1, A_2) を位相差 ϕ を用いて,

$$A_1(t) = E_1 \sin 2\pi ft, A_2(t) = E_2 \sin(2\pi ft + \phi) \quad (2.12)$$

とすると, それらの間の干渉縞強度 I は

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(2\pi d/\lambda_0) \quad (2.13)$$

となり, I は d に対して周期 λ_0 で正弦的に変化する.

< 導出 >

上で,

$$A_1(t) = E_1 \exp(j2\pi ft), A_2(t) = E_2 \exp j(2\pi ft + \phi) \quad (2.14)$$

とおき,

$$\begin{aligned} I &= |A_1 + A_2|^2 \\ &= |(E_1 + E_2 e^{j\phi}) \exp(j2\pi ft)|^2 \\ &= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos \phi \end{aligned} \quad (2.15)$$

としても, 上述の式が導かれる.

< 例題 >

自らの手で導出を行い, 式変形が正しいことを確認せよ.

2.4 フォトニックセンサ

フォトニックセンサは、図 2-28(a) に示されるように、送・受光用光ファイバ束と反射板（測定対象）とから構成され、測定対象の変位を受光用光ファイバ束に入る光量で測定するものである。図から知れるように、光ファイバ束先端と測定対象との距離により、送、受光される光の減衰量が異なり、また、送光用光ファイバ束を出た光が到達する範囲 A と受光用光ファイバ束に入射する範囲 B との重なり B_1 の大きさも異なるため、受光光量が変化する。図 (a) の場合、反射板の光ファイバ束先端からの距離と受光量との関係は同図 (b) に示されるようなものとなる。

なお、この関係は送・受光用光ファイバ束の空間的配列によっても異なり、図 2-29(a), (b), (c) 各配列に対する光ファイバ束先端からの反射板の距離と受光量との関係は同図 (d) に示されるものとなる。なお、変位や振動などの計測には受光量（出力電圧）と間隙の関係が直線で表される範囲を用いる。

すなわち、フォトニックセンサでは

- ① センサの構成：送・受光用光ファイバ束、および、反射板（測定対象）
- ② 測定するもの：測定対象の変位を測定する
- ③ 測定の方法：受光用光ファイバ束に入る光量で測定する

送受光に用いる光の減衰量が（光ファイバ束先端と測定対象との）距離によって異なる。

また、範囲 A と範囲 B との重なり B_1 の大きさも異なるため、受光光量が変化する。

（範囲 A：送光用光ファイバ束を出た光が到達する範囲）

（範囲 B：出た光が受光用光ファイバ束に入射する範囲）

である。なお、

- ④ この関係は送・受光用光ファイバ束の空間的配列によっても異なる。
（図は資料参照のこと）

2.5 三角測量法

三角測量法は距離測定に広く用いられる．図 2-30 (図は資料参照のこと) のように，距離の既知な基線の両端 A, B において対象 C への直線が基線に対してなす角 α, β を測定すれば

$$\frac{\overline{AC}}{\sin \beta} = \frac{\overline{BC}}{\sin \alpha} = \frac{\overline{AB}}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2.16)$$

の関係に基づいて C までの距離が求まる．つまり， $\overline{AB}, \alpha, \beta$ は既知であるから，上式より $\overline{AC}, \overline{BC}$ が求まるのである．

< 応用：自動焦点カメラ >

像合致法による測距方式はカメラの焦点合わせの方式として広く利用されている．すなわち，レンズの繰り出しに連動して角度の変わる反射鏡からの像と直接像との合致を眼で検出してレンズの繰り出しを調節し，焦点を合わせるのである (図 2-34(a))．像の合致を眼でなく二つのイメージセンサを用いて自動化したオートフォーカスカメラも実用化されている．この方式のカメラの光学系を図 2-34(b)，イメージセンサを (c)，動産原理を (d) に示す．図からわかるように，イメージセンサは 4 個の短冊状検出素子からなり，対応する素子出力間の合致の度合い (相関関数 (d)) が求められ，相関が最大となる距離 R に対応する繰り出しでレンズが固定されて，シャッタが切られるようになっている．図 (c) のピーク検出回路では，相関関数の最大ではない極大のピークでレンズが固定されてしまわないように，ピーク値をホールドし，それよりも高いピークが検出できるようにしてある．

三角測量を用いる自動焦点方式には，イメージセンサに入射する光として，自然界に存在する光 (太陽光など) をそのまま利用するものやカメラから赤外光を出し，対象からの反射を利用するものなど，この他にもいくつかの方式がある．

(a) FCM 方式 (図 2-35): シャッタの閉じている時点で光路 I の像を記憶しておき，シャッタの開いた時点で光路 II の像を同じ検出素子上に結像させて記憶されている像と比較する．回転鏡の回転に従って光路 II の像は移動するので，像の合致した回転位置で合焦点が得られる．

(b) SST 方式 (図 2-36): 光路 I と II の像のズレを回転鏡を用いた機械的走査によらず，CCD アレイセンサの電子的走査で検出して合焦点を得るもので，CCD センサとしては 240 素子程度のものが用いられる．

(c) 赤外線投射方式: これには，カメラから投射する赤外光を振って対象物面を走査し，一定方向からの光を受ける検出器に最も強い反射光が戻ってくる投射角度から対象までの距離を知るもの (図 2-37(a)) と，赤外光は一定方向に投射し，その代わり検出器を並列して並べておき，最も強い反射光を受ける素子の位置を，素子出力を電子的に走査することで知って，対象までの距離を知るもの (図 2-37(b)) とがある．

なお，自動焦点方式には，前述の超音波を用いるレーダ方式，上の三角測量方式のほかにも，像面での変化 (横ズレやコントラスト) を検出する相関法やコントラスト法などもある．

2.6 別紙：ピントの合わせ方

2.6.1 「ピントを合わせる」とはどういうことか？

「ピントを合わせる」とはどういうことか？、について述べる。

- ① 撮影用のレンズは「凸レンズ」を用いている。
- ② 凸レンズは「焦点」を中心にして、「上下逆にした画像」を反対側に作る。
- ③ 「写真」とは、この上下逆の画像（結像）をフィルムに写し取るものである。
- ④ このとき、「画像」と「フィルム」を一致させないと画像がぼやける。
- ⑤ 「ピントを合わせる」とは、レンズを移動することで画像とフィルムを一致させることである。
(ヘリコイド：リングを回すことでレンズを前後に移動 ピントを合わせる仕組みのこと)
(一眼レフ：フィルムのところに「擦りガラス」状のスクリーンを置いて覗いているようなもの)

2.6.2 ピントの合わせ方の種類

これより、ピントの合わせ方の種類を歴史に沿って述べていく。

- ① 目測式：目で見て被写体までの距離を推測する方式（レンズには距離目盛などが付いている）
- ② 固定焦点：パンフォーカス・被写界深度（ピントの合う範囲）を利用する方式
- ③ 二重像合致式：三角測距法を用いる。被写体・ミラー・ハーフミラーの三角形を作る。
- ④ アクティブ方式：カメラ側が照射して距離を測る方式。ソナー方式（音波）や赤外線方式がある。
- ⑤ コントラスト検知式：直接レンズから情報を取り出す方式。（CCD でコントラストを測る）
画像がボケるとコントラストが下がることを利用してピントを検出する。
- ⑥ 位相差検知式：レンズから導いたスリット光をラインセンサの CCD で検知、位相を検出。

2.6.3 距離計が苦手なもの

距離計は以下の 4 つの環境を苦手とする。

- ① 暗い、 ② 低コントラスト
- ③ 連続した模様（縞々や水玉などの連続した模様があると、CCD が誤作動する）
- ④ 速い（早く動くものには対応できない）

2.6.4 その他

MF 一眼レフ・コサイン誤差・AF 一眼レフについて述べる。

- ① 一般的な MF カメラのファインダ：真ん中にプリズム式の距離計がある。
中央部：スプリット（縦線が上下でズレる）
その周囲：マイクロプリズム（画像がちらつく）
その外側：マット面（擦りガラス状で、ピントのボケ具合が分かりやすい）
- ② コサイン誤差：ピントを合わせた後カメラの向きを変えると、ピントが甘くなる。
ピントの合った距離からコサインの分だけ距離がズレるため、コサイン誤差が生じる。
- ③ 一般的な AF カメラのファインダ：共通部はフォーカスエリアとマット面くらい。
実際には、色々なエリアが表示されており、露出やら距離やらを測る。
スクリーン部分（マット面）と AF が働く部分（測距エリア）に大まかに分かれる。

3 速度測定，回転速度測定

3.1 ドップラー法

図 3-1 を描く．

< 応用：流速測定 >

レーザ光によるドップラーシフトを利用した流速測定系の構成例を図 3-3(a)，(b) に示す．この方法は、非接触であるため高温気体や高速流体，強腐蝕性流体などの測定に適していること，レーザスポットはきわめて小さく収束させられるので局所的な流速測定，あるいは流速分布の測定に使用できること，さらに，測定できる流速範囲が広い（特に極低速度）ことなどの利点がある．

4 光ファイバ応用計測

4.1 特徴

光ファイバをセンサに応用することの利点は、第一に、ファイバが電氣的には無誘導性、無放電性、高耐圧性、高絶縁性をもつこと、また化学的にはファイバ本体の石英が耐熱性、耐酸性、耐水性など高い安定性をもつことから、ファイバ計測が電氣的・化学的に悪環境下の測定手法として従来 of 電氣的手法に比べ優れている点にあるといえる。