

【計測工学】

# 4. 距離と物体 長さの計測

計測システム研究室 章 忠、今村孝

# 3. 計測の誤差とその表現法

## 3.1 確率と統計(復習)

1)統計確率の定義、2)確率の公理、3) 確率密度、分布関数、正規分布

## 3.2 計測誤差の定義と種類

系統誤差、偶然誤差、間違い誤差

## 3.3 偶然誤差の三公理

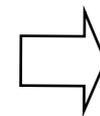
誤差が起こる確率: 小さい誤差、大きい誤差、絶対値同じ誤差

## 3.4 Gauss(正規)分布

1)正規分布の特性、2)正規分布の特性パラメータ

## 3.5 正確さと精密さ

“偏り”の小さい程度を正確さ(accuracy)  
“ばらつき”の小さい程度を精密さ(precision)



総合的なよさ  
**精度**

## 3.6 有効数値と数値の丸め

# 計測工学(前半)

## 1. 計測工学の概論

計測システムの基本概念と単位・次元

## 2. 計測器の基本特性とグラフ・最小二乗法

計測系の特性、計測結果の表示及び最小二乗法

## 3. 計測の誤差とその表現法

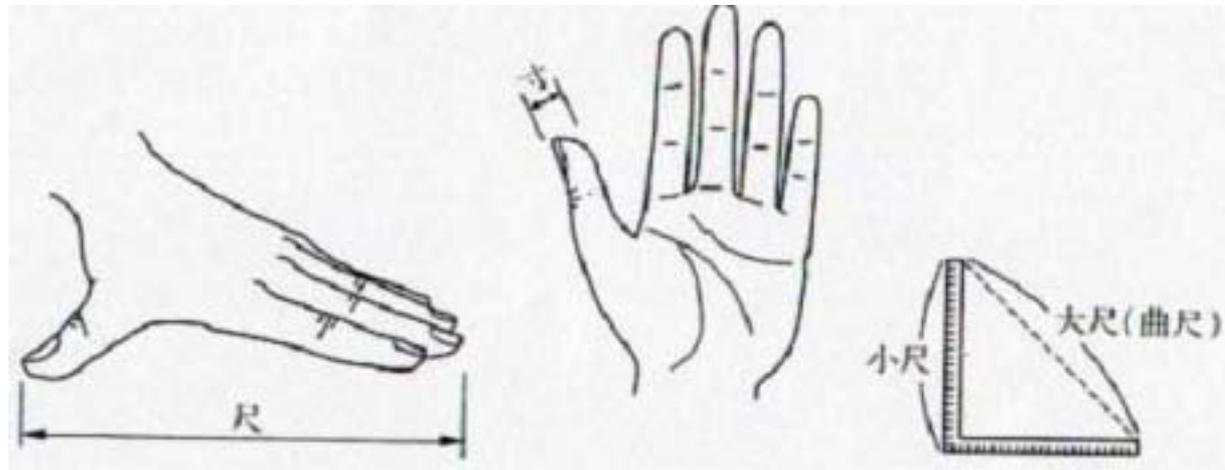
計測誤差の定義と種類、有効数値と数値の丸め

# 4. 距離と物体長さの計測

## 4.1 距離を測る

距離

- ・2点を結ぶ線分の長さ
- ・原子間の間隔 など



長さの国際共通単位:メートル(m)

道具を使わない場合

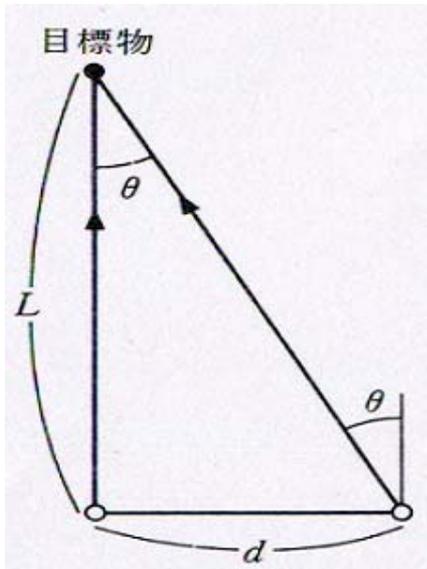
- (1) 目視測
- (2) 歩幅を一定にして歩数を数える など

## 4.1.1 立体間隔や反射をならった計測方法

- (1)三角測量
- (2)パルス電磁波伝播時間測定
- (3)変調電磁波信号の位相測定
- (4)光干渉法

など

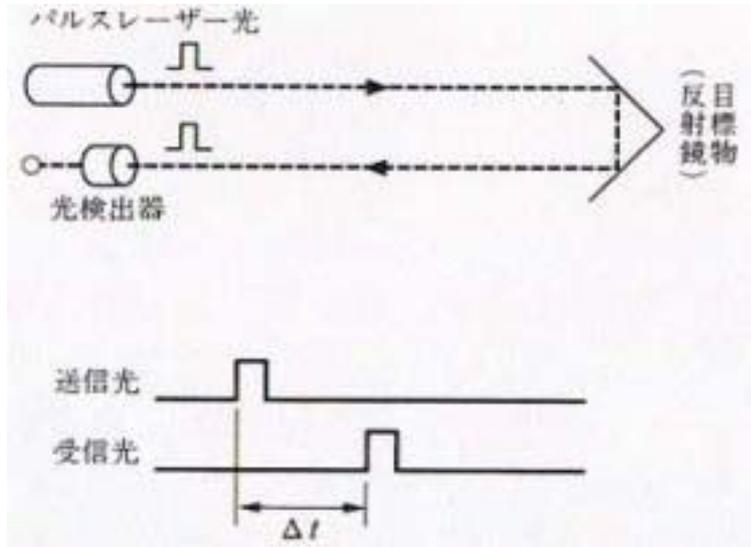
### 1)三角測量



$d$ (m)離れた2カ所から目標を眺めたときの振れ角(視差角)  $\theta$ と距離  $L$ (m)は次式の関係にある。

$$L = \frac{d}{\tan \theta}$$

## 2)光パルス伝播時間測定

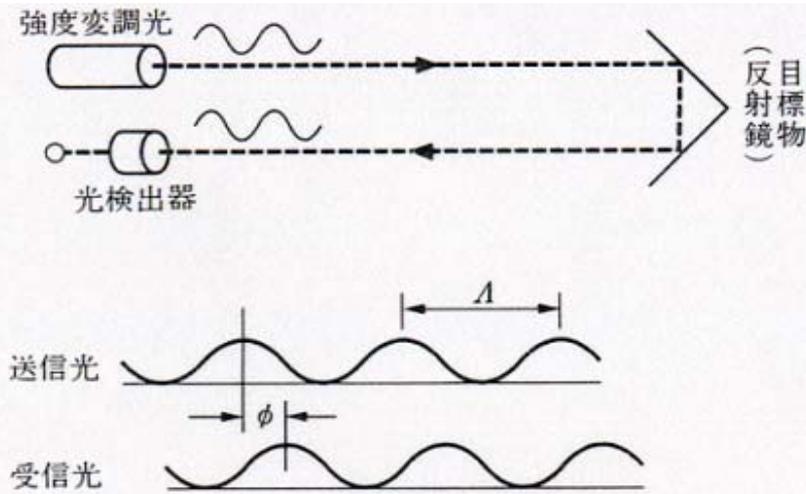


目標物に照射して反射光を受信する。

$$L = \frac{c\Delta t}{2}$$

( $c$ : 測定環境中の光速)  
分解能は数mm程度

## 3)強度変調光の位相測定 (2)の光パルスと同じ原理)



周波数  $f$  (Hz) で変調された光信号の変調波長  $\lambda$  (m) は,  $\lambda = c/f$  ( $c$  は光速, m/s) となる。

送信光と受信光との位相差  $\phi$  (rad) との間の関係

$$L = \frac{1}{2} \left( N + \frac{\phi}{2\pi} \right) \lambda \quad (N=0,1,2,\dots)$$

から距離  $L$  がわかる。

(条件  $L < \lambda / 2$ )

## 4)光波干渉計

光は横波であり, 単色光の振動は正弦波とみなせる。  
光の振動数: 500THz (テラヘルツ:  $10^{12}$ Hz)

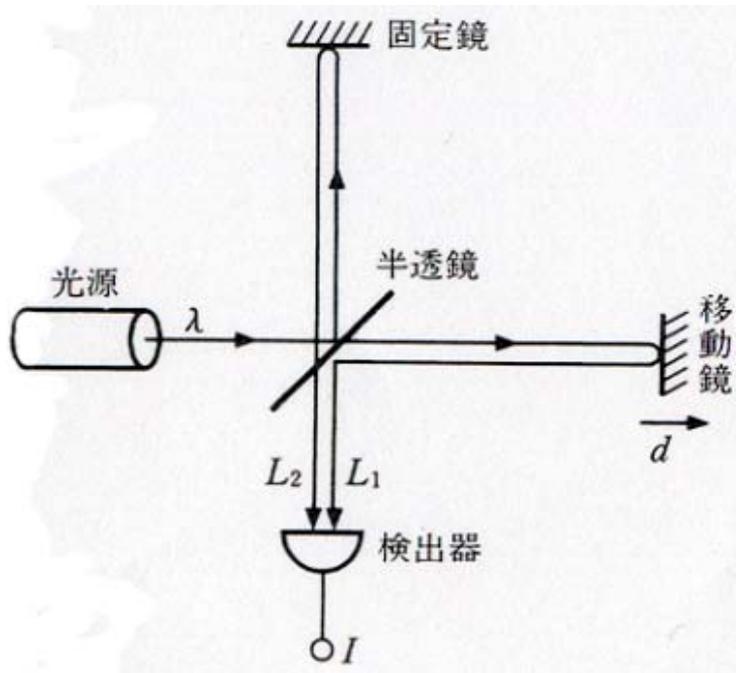
現在の光検出器での波の位相は直接観測できない。

位相情報は低周波数の光強度情報で取り出す。

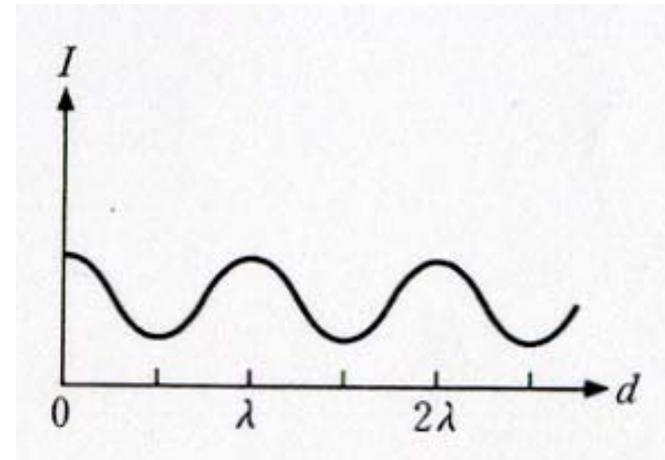
目標物から戻ってきた光を基準の光と重ね合わせて干渉させる。

# マイケルソン干渉計 (Michelson interferometer)

## 光学系



## 検出器出力



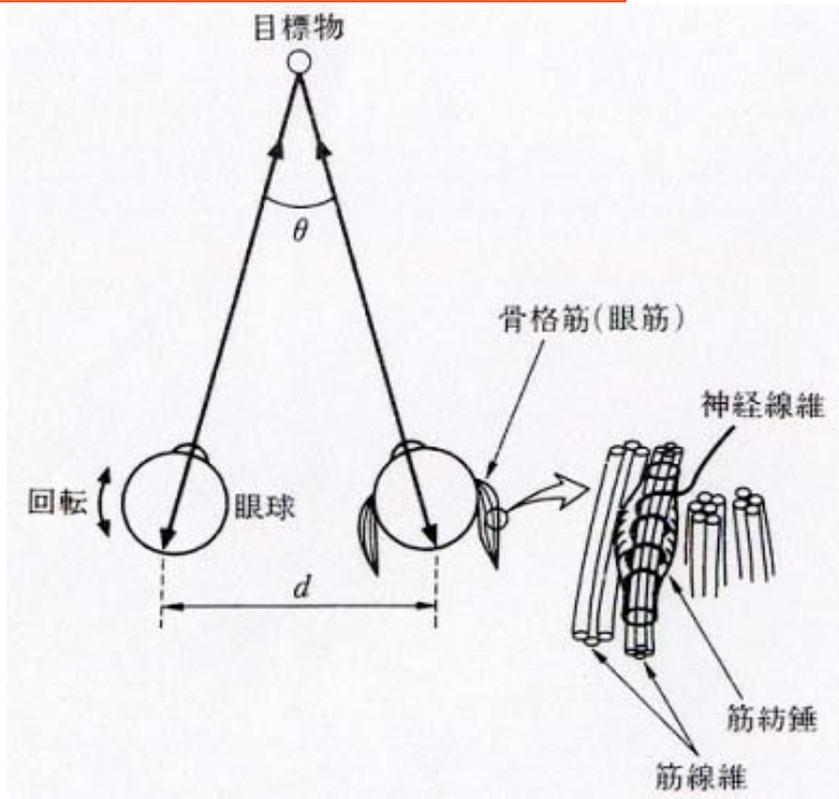
光の波長  $\lambda$ (m), 基準光路長  $L_2$ と測定光路長  $L_1$ の差  $d$ (m)とする。

$$I = A + B \cos(2\pi d / \lambda) \quad (\text{ただし, } A > B > 0)$$

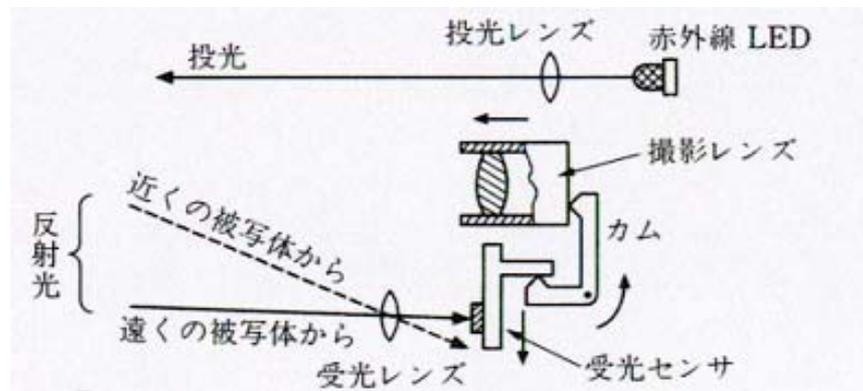
$I$ の変化を観測すれば, 波長の1/10程度の分解(50nm程度)で移動距離がわかる(精密計測)。

# 4.1.2 目視測

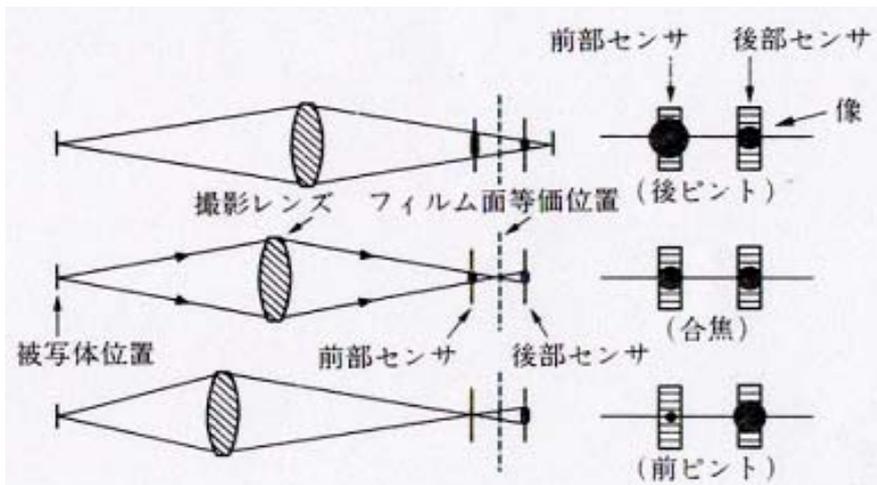
## 1) 目視による距離計測



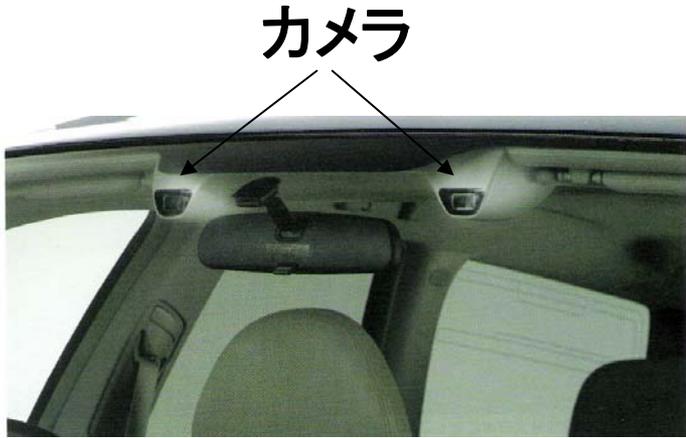
## カメラのオートフォーカス



## 焦点合わせ方式



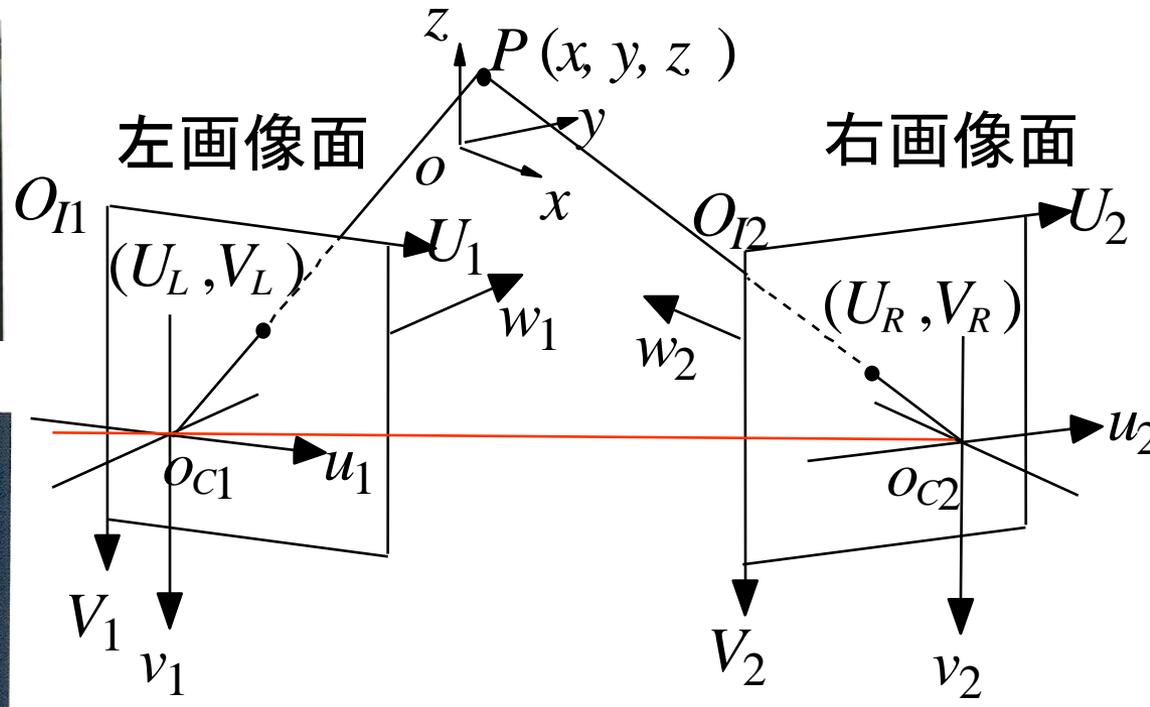
# クルマ車室内のステレオ画像認識システム(実例)



(a)装着例



(b)検出例



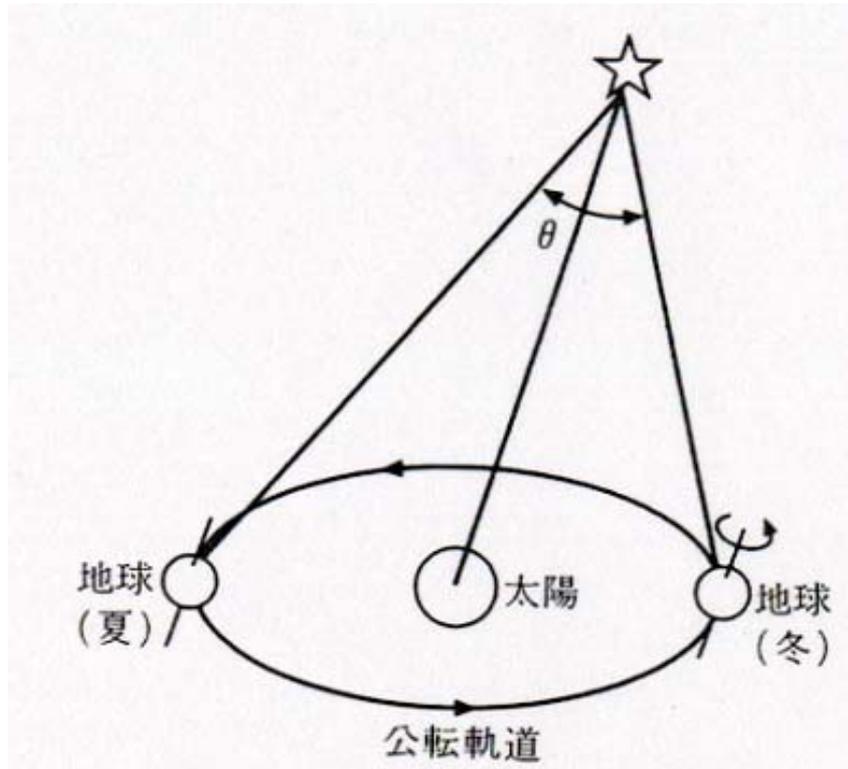
両眼視の原理に基づくステレオ計測

## 本田のステレオ画像認識システム

## 4.1.3 距離による計測方法の違い

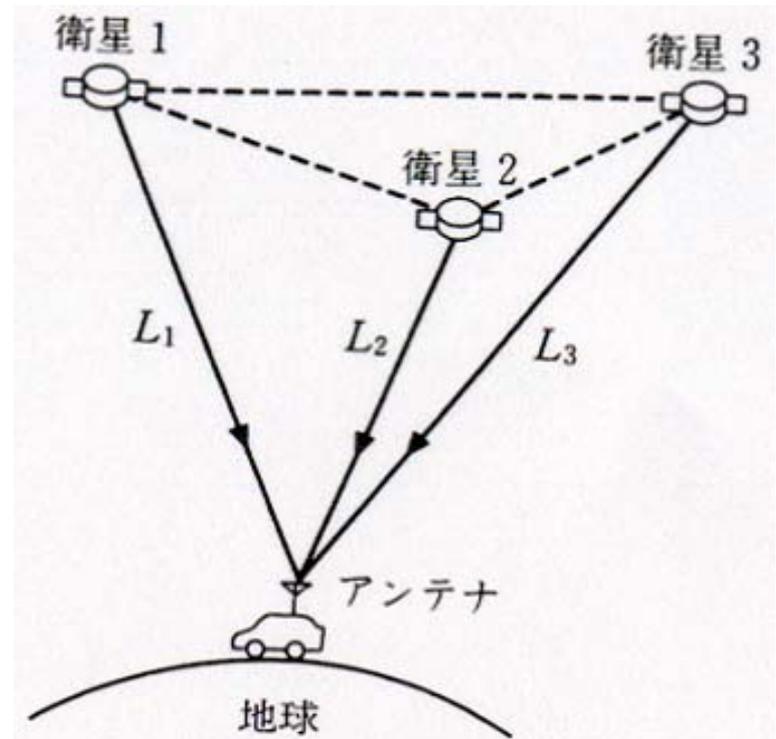
### 1) 遠距離を測る(100km以上)

#### 星までの距離



年周期差による三角測量

#### GPSの原理



カーナビ

## 2)中距離を測る(数十km~100m)

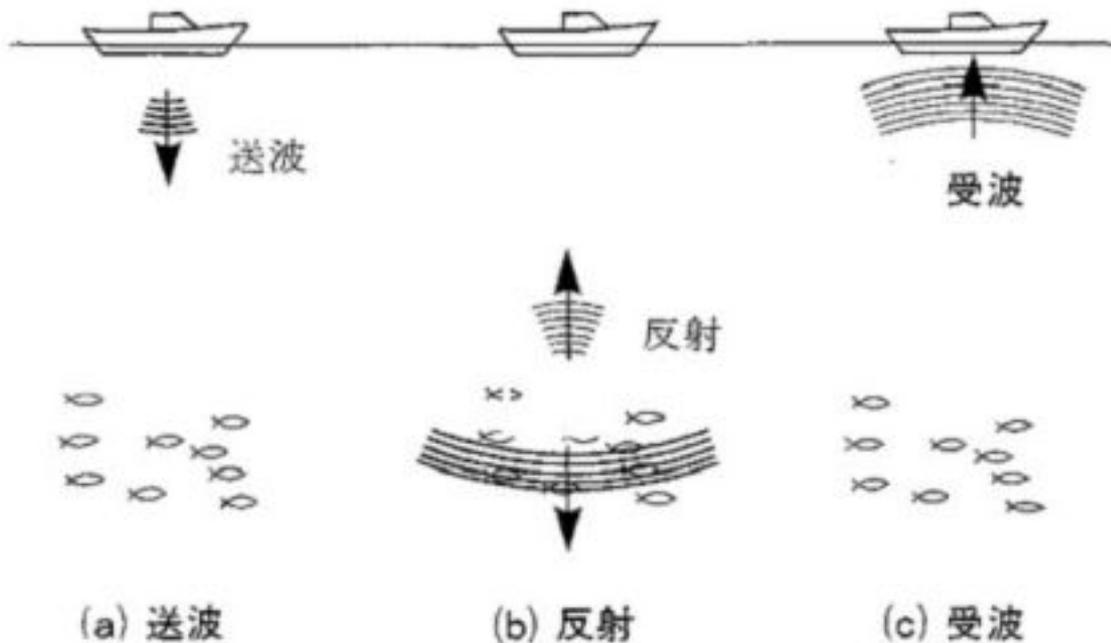
### ・海底の地形測定

瞬間パワーの大きいパルス光方式

青緑色のNd:YAGレーザーの532nmのパルス(飛行機に搭載)

### ・魚群探知

超音波パルス(50-100kHz)(水面の反射を避けるため船に搭載)



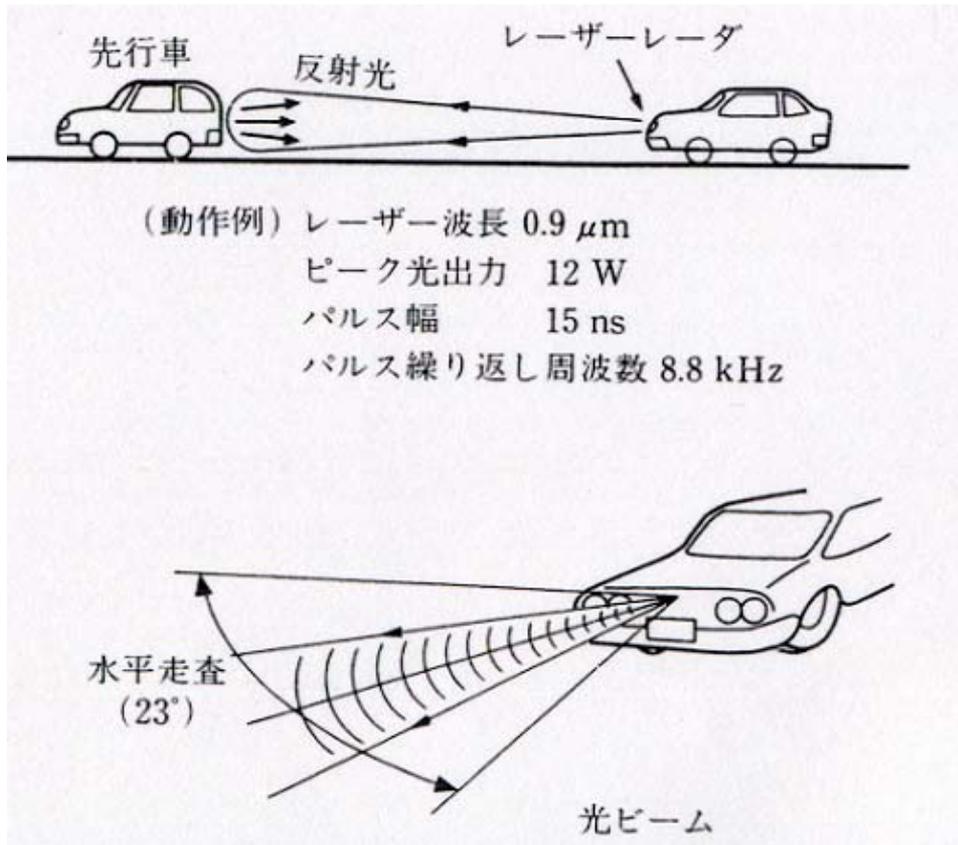
内部傷検出  
内部気泡

図3-1 魚群探知機の原理

### 3) 近距離を測る(100~10m)

## 自動車用レーザーレーダ

### パルス光伝播時間測定方式



## 半導体パルスレーザー

### 動作例:

レーザー波長  $0.9 \mu\text{m}$

ピーク光出力  $12 \text{ W}$

パルス幅  $15 \text{ ns}$

パルス繰り返し周波数  
 $8.8 \text{ kHz}$

### 検知能力

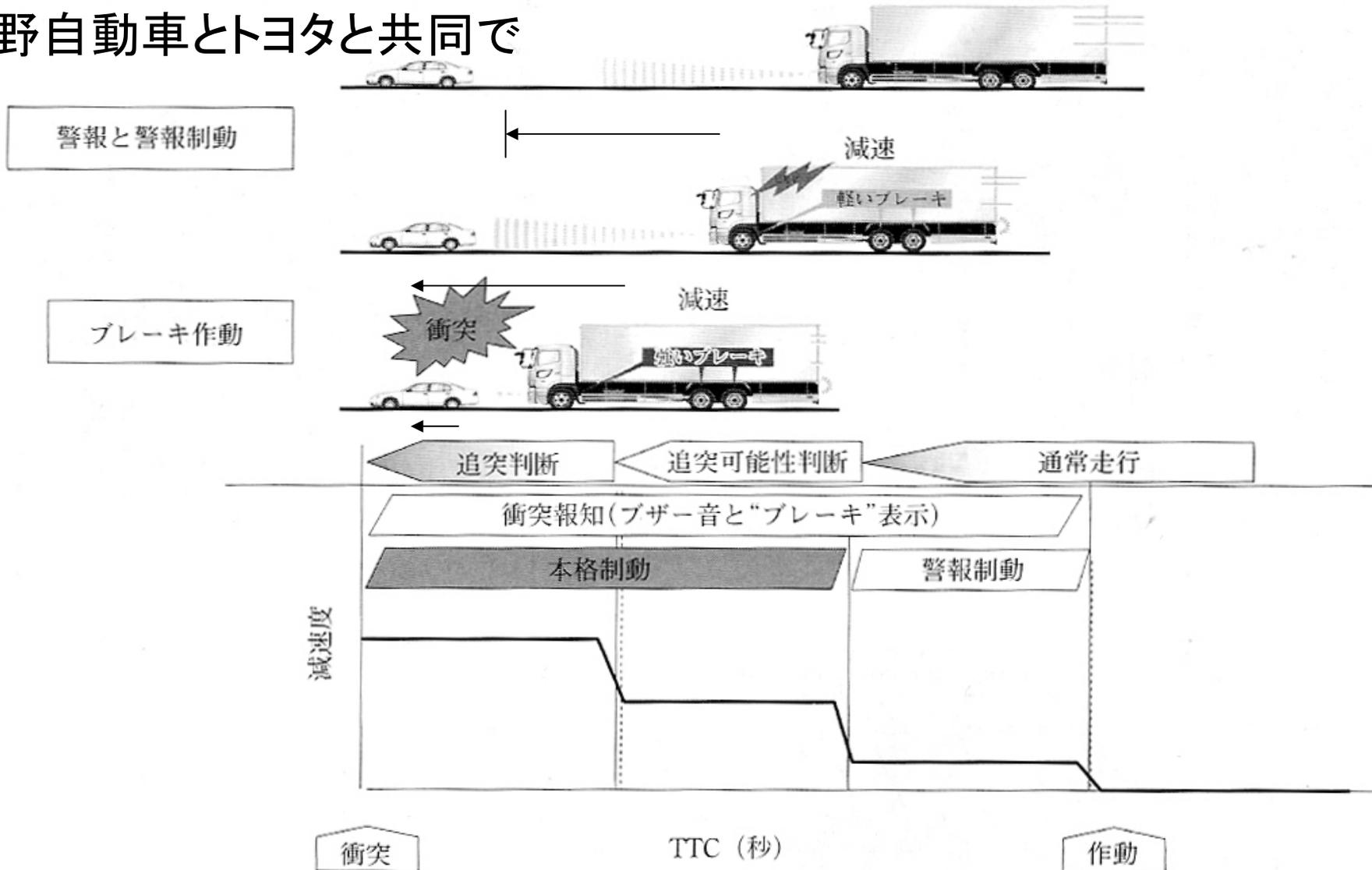
車 晴天: 150m以上

雨天: 140m

人 衣服の反射率により  
40~50m

# プリクラッシュセーフティの実例

日野自動車とトヨタと共同で



ドライバーが警報に気づかずシステムが制動を行った場合

## 4.2 長さを測る

### 5.2.1 直接法と間接法

#### 長さの測定方法

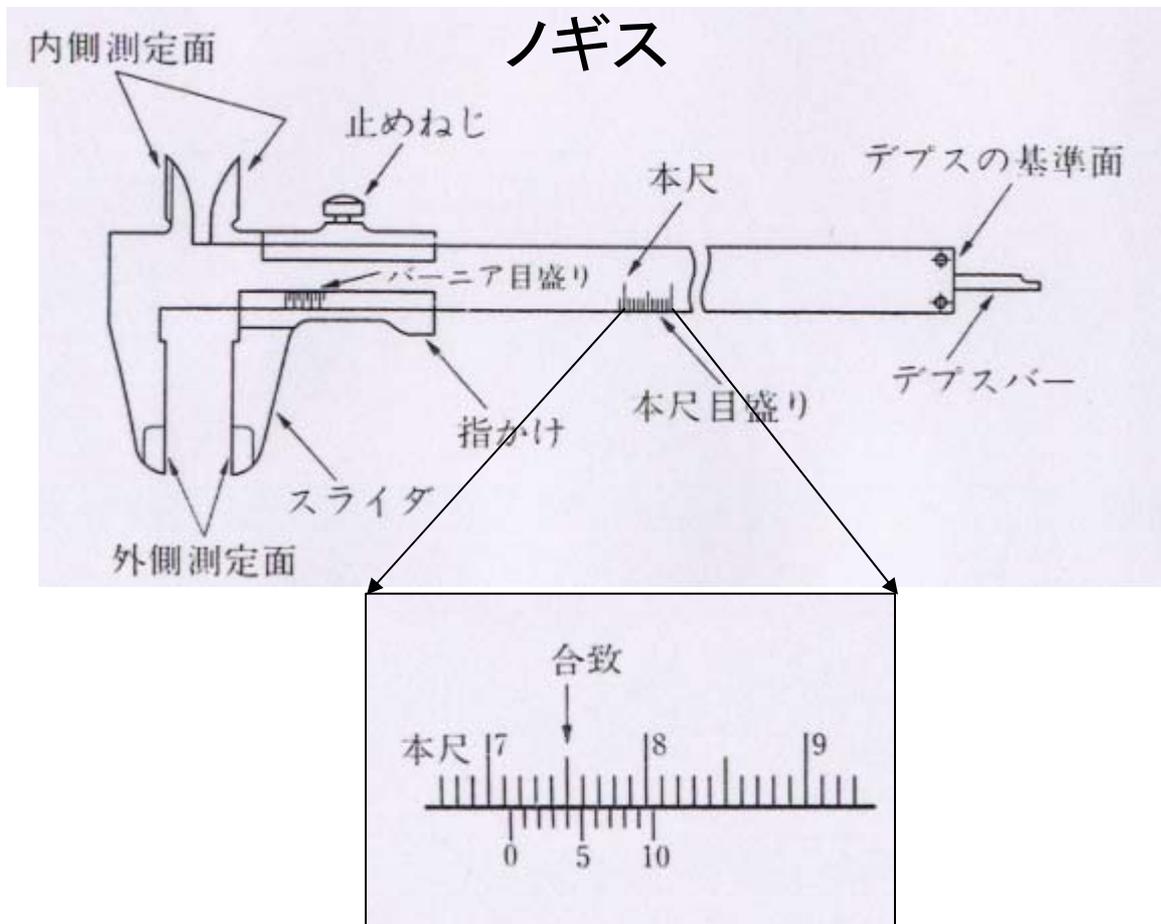
- (1)物差しなどの標準尺と直接比較する直接測定
- (2)測定量と一定の関係にある物理量を直接測定して目的の数値を引き出す間接測定

種類	最小目盛り(mm)	確度( $\pm\mu\text{m}$ )	測定範囲(mm)	目盛り拡大方法
直尺	1または0.5	最良で50	0~1,000 (各種)	
ノギス	0.05	20	0~1,000 (各種)	バーニア機構
マイクロメータ	0.01	2	0~25	ねじ送り
ダイヤルゲージ	0.01	10	0~10	歯車
ミニメータ	0.001	0.5	$\pm 0.03$	てこ
オブチメータ	0.001	0.5	$\pm 0.1$	光てこ
電気マイクロメータ	0.0005~ 0.005	0.25~2.5	$\pm 0.015$ ~ $\pm 0.15$	
空気マイクロメータ	0.001	1	$\pm 0.015$	空気圧
測長機	0.001	1	0~1,000 (6mのもの まである)	読み取り顕微鏡

## 4.2.2 読み取り目盛りの拡大

### 1) バーニア目盛り

基本長さを $n$ 等分した主尺の目盛りと対して、その $(n-1)$ 目盛りを $n$ 等分した副尺を滑らせて、主尺と副尺の目盛り刻線を一致した位置の数を読み取る。

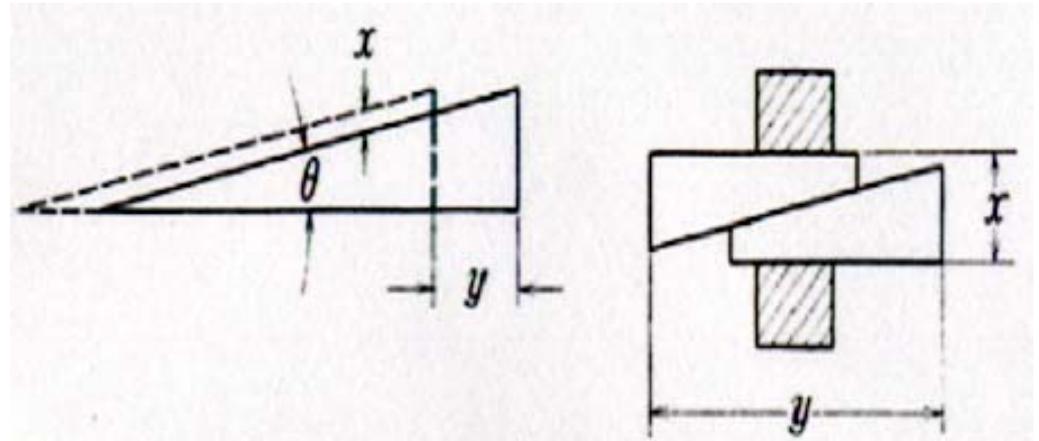


## 2)機械的拡大

### ・くさびによる拡大

拡大率

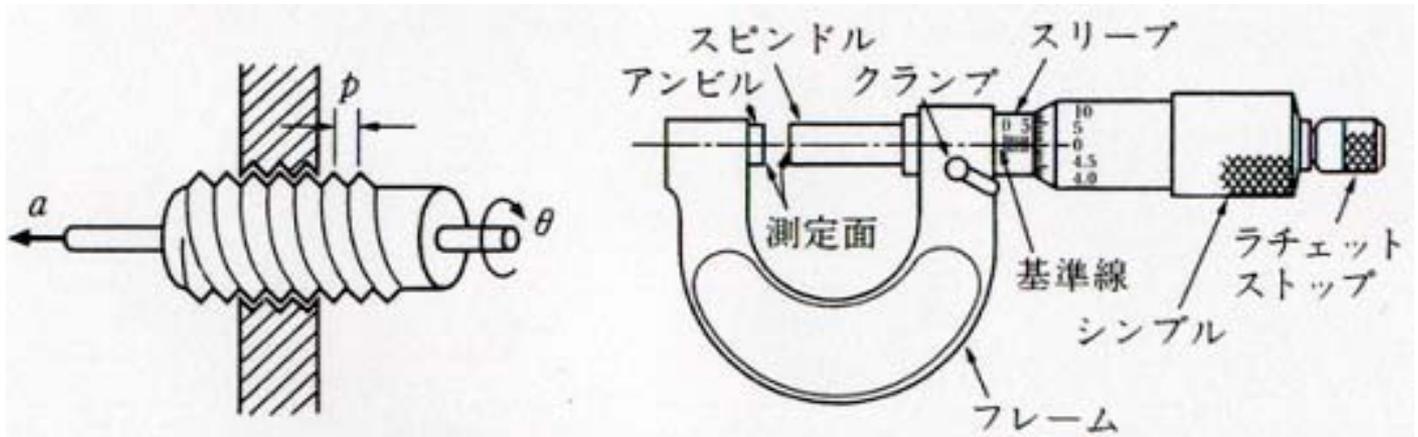
$$E = \frac{y}{x} = \cot \theta$$



### ・ねじによる拡大

マイクロメータ

$$a = \frac{\theta p}{2\pi}$$



ねじのリードを $p$ , アウタスリーブの外径を $D$ とすれば、  
拡大率は次式となる。

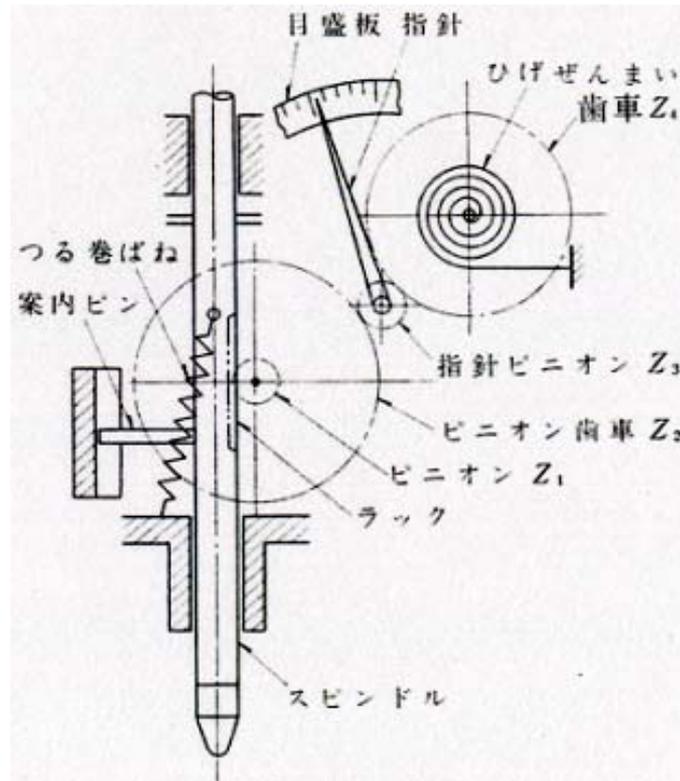
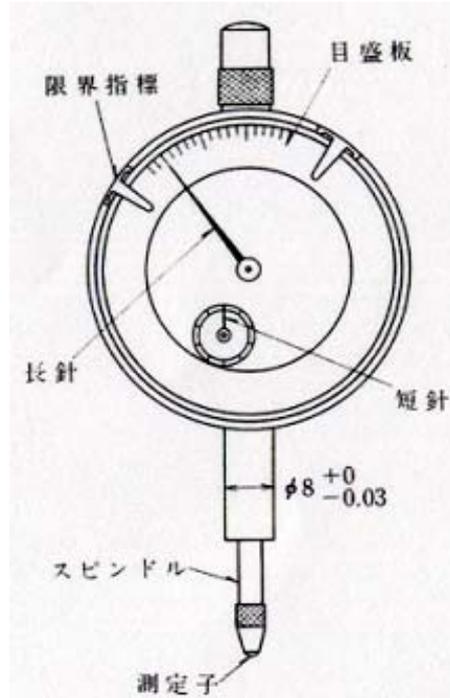
$$E = \frac{\pi D}{p}$$

一般的なマイクロメータは  $p=0.5\text{mm}$  であるので、  
 $D=14\text{mm}$  とすれば  $E=88$  倍となる。

マイクロメータの測定範囲は普通25mmで、それ以上に  
するとねじの累積ピッチ誤差のため誤差が大きくなる。

# ・歯車による拡大

## ダイヤルゲージ



測定範囲10mm  
または5mmのもの  
が多い。  
最小目盛りは  
普通0.01mm  
である。

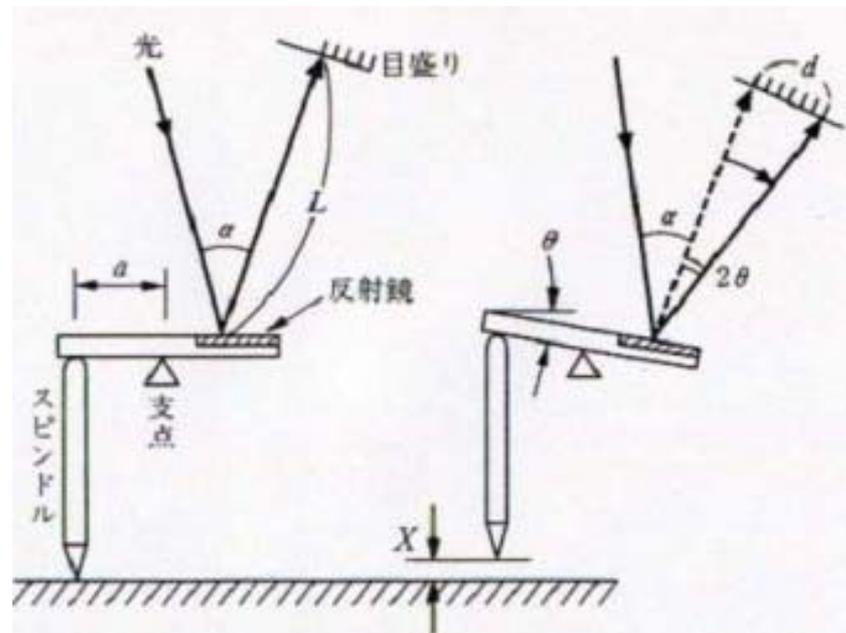
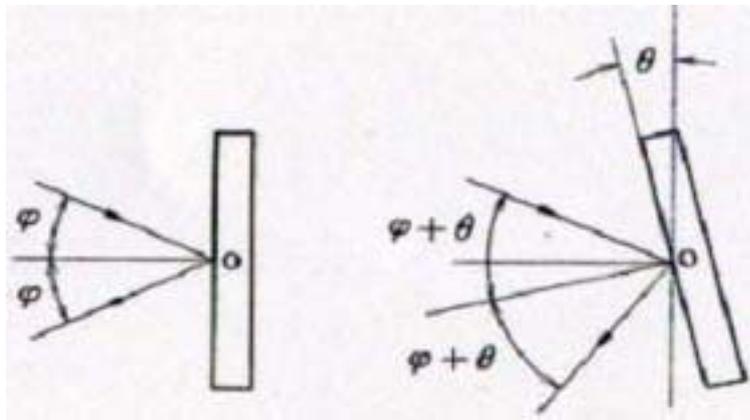
ラックとピニオン $Z_1$ のモジュールを $m_1$ ,ピニオン歯車 $Z_2$ と針ピニオン $Z_3$ のモジュール $m_2$ ,指針の長さ $l$ としたときの拡大率

$$E = \frac{m_2 Z_2}{m_1 Z_1} \cdot \frac{2l}{m_2 Z_3} = \frac{2Z_2 l}{m_1 Z_1 Z_3}$$

精度は歯車のかみあい誤差, 軸受けの遊び, 摩擦などに影響される。<sup>19</sup>

### 3)光てこによる拡大

#### 光てこの原理



反射の傾き  $\theta$ :  $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{x}{a}\right) \approx \frac{x}{a}$   
 反射鏡に光ビームを入射し、反射光を距離  $L$  のところで観測すると、移動量  $d$  は次式となる。

$$d = \tan(2\theta)L = \frac{2xL}{a}$$

代表的なもの: オプチメータ

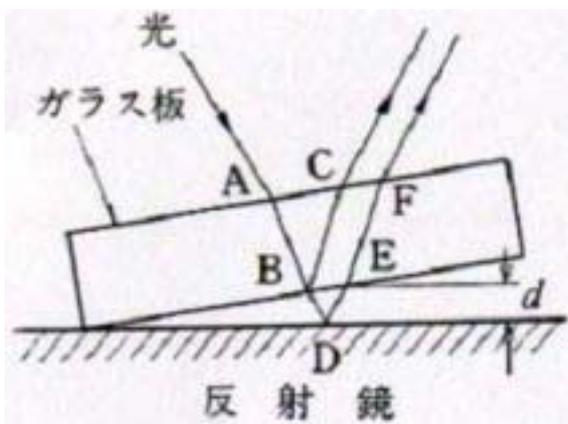
±100 μm の範囲を最小目盛り 1 μm で測定できる。



クリスタル・フォース顕微鏡  
(東陽テクニカ)

## 4)光波干渉による拡大

反射鏡の上に平行ガラス板をのせてわずかに傾け、上から観察すると干渉じまが見える。



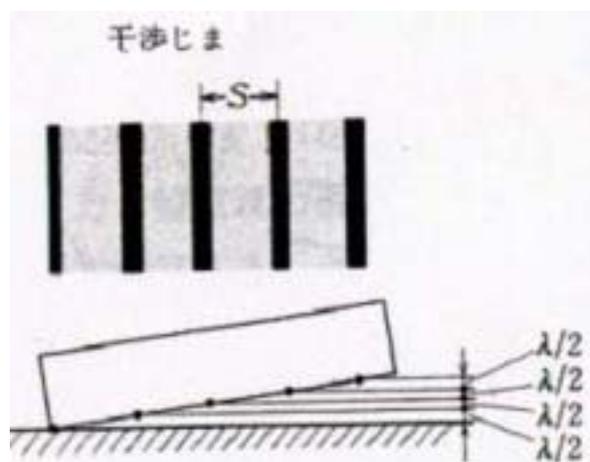
反射鏡での遅れ  $BDE \doteq 2d$

・ $2d = n\lambda$  ( $d = n\lambda/2$ ) のとき暗くなる。

・ $2d = (2n+1)\lambda$  ( $d = (2n+1)\lambda/2$ )

のとき明るくなる(BとE点で同位相)。

ここで、 $n=0, 1, 2, \dots$ で、 $\lambda$ は単色光の波長である。



右図の干渉じまによって距離 $d$ を知ることができる。

ここでは $\lambda/2$ がしまの間隔 $S$ に拡大されたと見ることができる。

$$E = 2S / \lambda$$

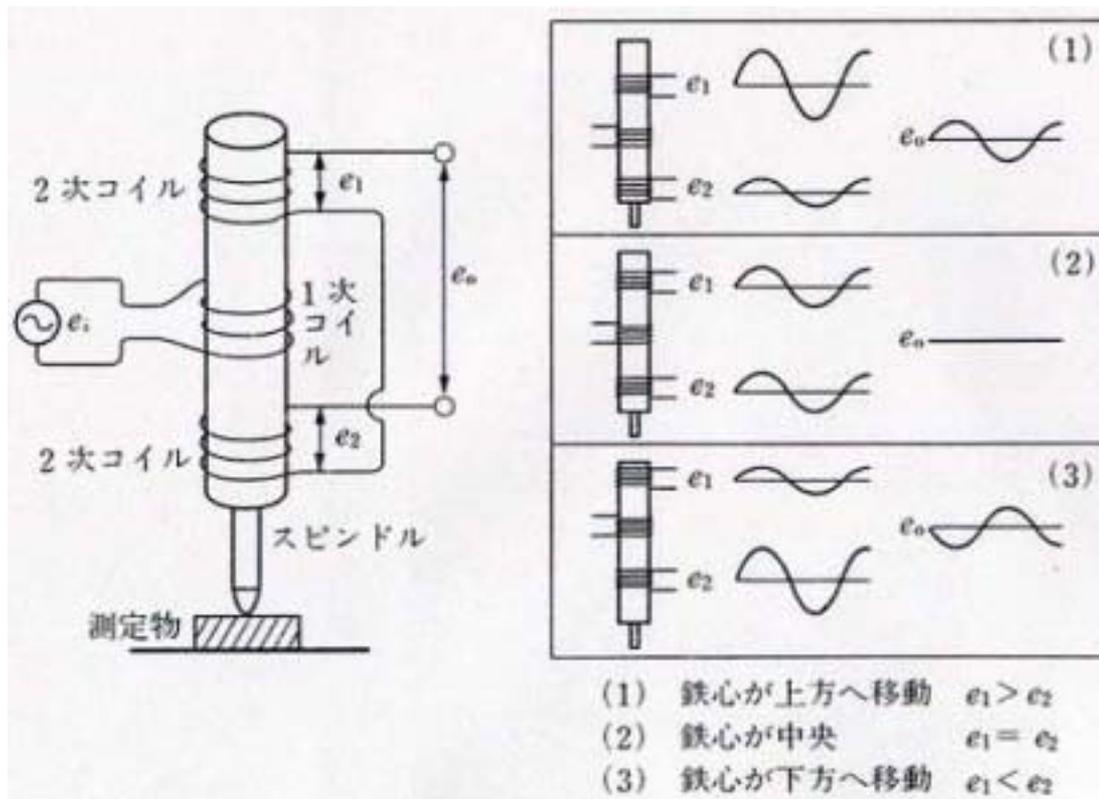
$\lambda/2 = 0.32 \mu\text{m}$ ,  $S = 2\text{mm}$ とすれば  
 $E = 6250$ 倍となる。

## 5)電氣的拡大

スピンドルの移動量を電気信号として取り出し、増幅器によって任意の倍率で拡大し、移動量を記録する方法である。

移動-電気信号変換方式: 抵抗変換, インダクタンス変換, キャパシタンス変換など

### (a)インダクタンス変換



中央に1次コイルを巻き、その両側に2次コイルを置いて差動的に接続する。1次コイルに交流電圧を加え、鉄心を通して1次コイルで作られた交流磁場が2次コイルへ伝達され、誘導電圧( $e_1, e_2$ )が生じる。コイルが差動接続されているので、出力電圧 $e_0$ は

$$e_0 = e_1 - e_2$$

となる。

## 応用例：可変インダクタンス 変換器を応用した地震計

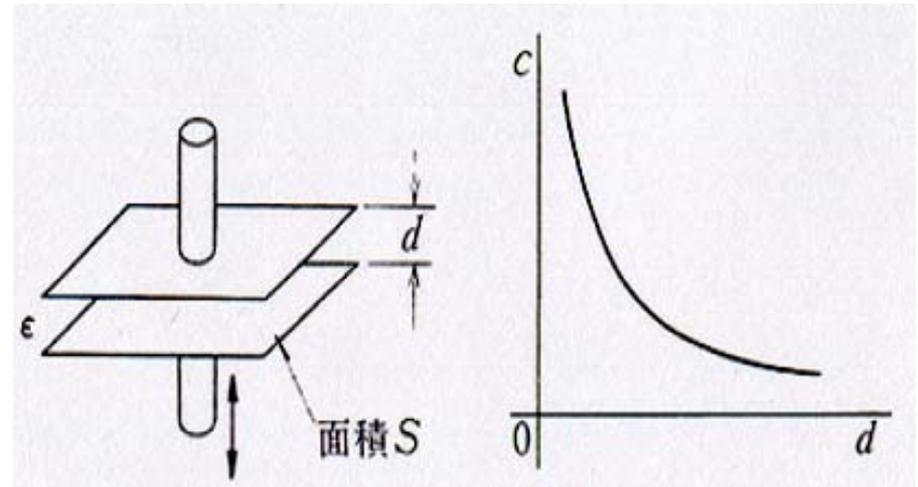
### (b) インダクタンス変換

平行な2枚の極板よりなるコンデンサの容量 $C$ は

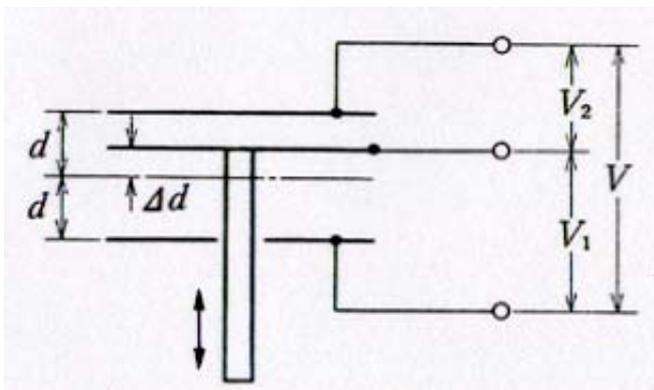
$$C = \epsilon S/d$$

で表される。ここで、 $\epsilon$ は誘電率、 $S$ は極板の面積、 $d$ は電極間距離を表す。

$\epsilon$ 、 $S$ 、 $d$ のどれかを変化させれば $C$ が変化する。長さの変換機としては $d$ を変化させるものが多い。



### 3極コンデンサ式変換機



固定極板間の電圧を $V$ 、中央位置での極板の間隔 $d$ 、中央極板を $\Delta d$ だけ変位させたときの固定極板との電圧をそれぞれ $V_1$ 、 $V_2$ とすれば

$$\Delta V = V_1 - V_2 = V \Delta d / d$$

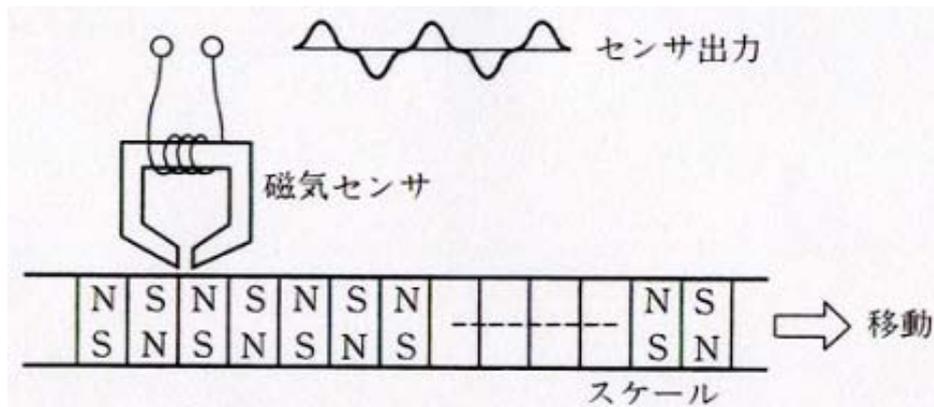
となる。

## 6) デジタル化

自動化する場合は人が目盛りを読み取る代わりに測定量を直接デジタル化して電気信号として出力する。

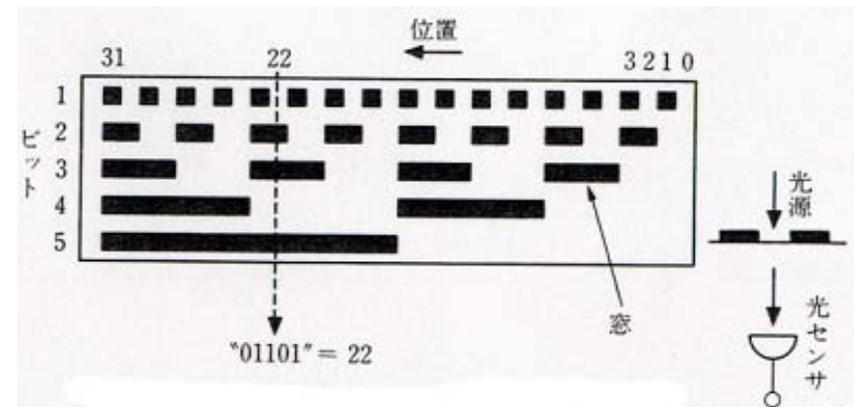
### リニアエンコーダ

#### 磁気スケール



磁化の方向が交互に反転した素子を並べてスケールとする。スケールの移動を磁気センサで検出すると移動量に比例したパルス数が得られる。

#### 光学的パルススケール



ガラス板の上に格子を印刷した光学的スケールである。スケールを挟んで光源と光センサを置き、光の透過を読み取るとセンサの出力は明と暗どちらかになるので、これを1と0に対応させる<sup>24</sup>。

## 4.2.3 接触測定一測長機

高精度デジタル測長機  
((株)ミットヨ)

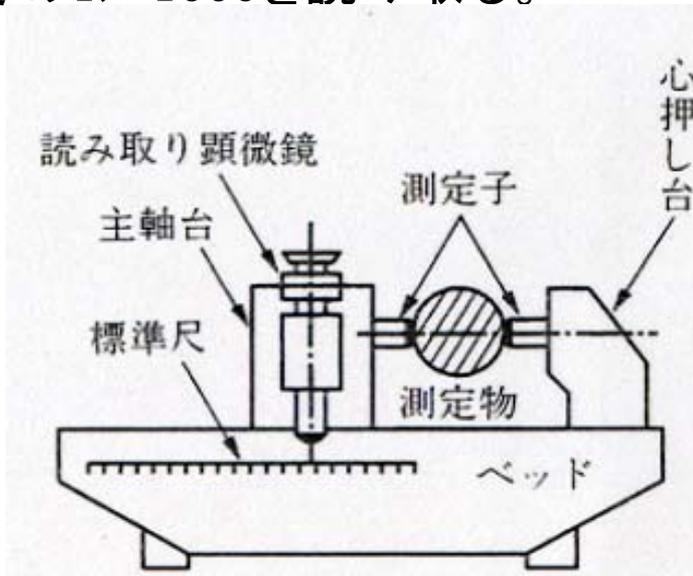


測定物の実寸を求めるときには、測長機が使われる。

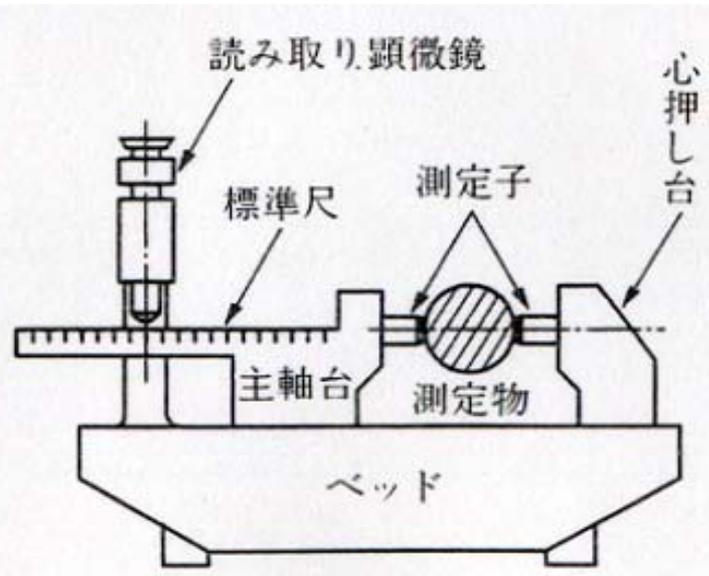
検査に使うゲージ類や精密部品、あるいは工具など基本的な長さの測定には不可欠である。

万能測長機：測長機に角度、形状測定機能をつけたもの

標準尺の最小目盛りは1mmであるが、補助目盛りと顕微鏡を用いて、その1/1000を読み取る。



(a) 標準尺を台に固定する



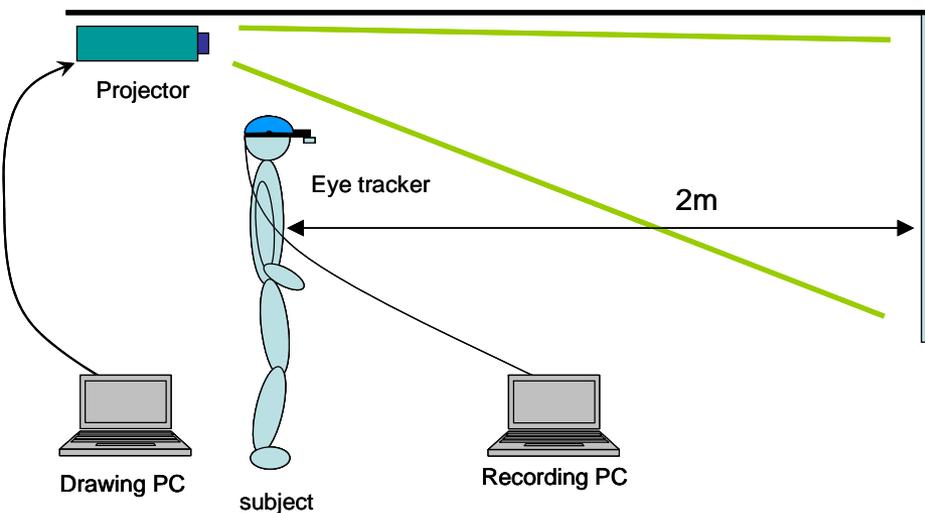
(b) 標準尺と測定物を直線上に並べて移動させる

# 注視を計測する実例

車両前方映像を見せ、その際の視線位置をアイマークレコーダ (NAC社製, EMR-9) を用いて計測した例。



アイマークレコーダ



実験構成



出力動画

被験者に非接触で視線を計測するシステムは来週に紹介<sup>26</sup>

## 4. 物体(長さ, 距離)を測る

### 4.1 距離を測る

#### 4.1.1 立体間隔や反射をならった計測方法

- 1)三角測量、2)光パルス伝播時間測定、3)強度変調光の位相測定、4)光波干渉計

#### 4.1.2 目視測

- 1)目視による距離計測、2)3次元位置のステレオ計測

#### 4.1.3 距離による計測方法の違い

- 1)遠距離を測る(100Km以上)、2)中距離を測る(数十km~100m)、3)近距離を測る(100~10m)

### 4.2 長さを測る

#### 4.2.1 直接法と間接法

#### 4.2.2 読み取り目盛りの拡大

- 1)バーニア目盛り、2)機械的拡大、3)光てこによる拡大、4)光波干渉による拡大、5)電氣的拡大、6)デジタル化

#### 4.2.3 接触測定一測長機

## 演習問題IV:

- 1) パルス光伝搬時間測定の原因を簡単に説明せよ。
- 2) 静電容量型センサで極板の有効面積 $S$ を変化させた場合、容量の変化率  $\Delta C/C$  はどのようなになるか説明せよ。
- 3) 光てこの原因を簡単に説明せよ。