

ナノメートル計測学 システム創成学科BISコース

2005年5月23日
東京大学工学系研究科精密機械工学専攻
高増潔

Glasgow 2004

- 4th euspen International Conference and 6th Annual General Meeting: may 30th - 3rd June 2004, SECC, Glasgow
 - Micro and Nano technologies are advancing rapidly into our everyday lives, increasing our prosperity, our health, our environment and our quality of life. The technology for making very small products requires many different disciplines. The European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen) links industrialists to researchers across 27 countries in an influential and extended network of people involved in the development, application and commercialisation of these ultra-precision engineering technologies.



2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 2

Topics

- Session 1- MEMs Design, Fabrication & Market Review
- Session 2- Non Contact (Non Mechanical) Micro Fabrication Processes & Novel Materials
- Session 3- Contact (Mechanical) Micro Fabrication Processes & Assembly
- Session 4- Nano/ Precision Manufacturing Processes & Systems
- Session 5- Nano Metrology, Positioning & Sensors
- Session 6- Ultra Precision Measurements
- Session 7- Ultra Precision Machines & Control Systems

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 3

案内とカップリング

Drive Couplings & Mechanics of Contact

- Introduction
- Surface contact under different load conditions
 - Stationary and sliding contacts of a sphere and a flat
 - Rolling contacts
- Linear drive couplings
- Rotary drive couplings
 - Elastic rotary couplings
 - Rolling rotary couplings (the knife edge)
 - The sliding rotary coupling
- Case study: Irving Langmuir's surface tension instrument for the determination of the molecular sizes of fatty acids

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 5

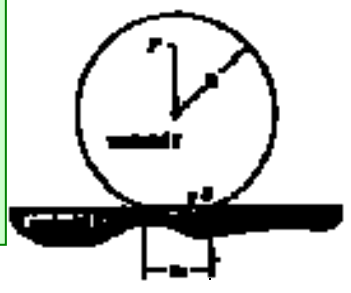
Contact of a Sphere on a Flat

- Hertzian analysis

$$a = \left(\frac{3PR}{4E^*} \right)^{1/3}$$

$$\delta = \left(\frac{9P^2}{16RE^{*2}} \right)^{1/3}$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$



2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 6

Contact of ball rolling in conforming groove

Labels in diagram: *contact radius*, *groove radius*, *groove width*.
 Text below diagram: *Image of ball and groove for micro-robotic drive*

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 7

Drive Couplings

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 8

Ball and Flats Coupling

Figure 24: *Ball and flats coupling mechanism*

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 9

Bi-directional Linear Axis Coupling

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 10

Wire and Ribbon Drive

Figure 25: *The various ribbon drives: a) parallel wire drive, b) parallel wire drive, c) the ribbon drive*

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 11

Elastic Rotary Couplings

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 12

Sliding Rotary Drive

Figure 4.30 A sliding rotary drive

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 13

材料の選択

Material Selection

- 構造パラメータマップ
 - 熱外乱の影響
 - 振動外乱の影響
- 連続体の温度分布(1次元)
 - θ 温度 (K)
 - t 時間 (s)
 - x 距離 (m)
 - C 比熱 specific heat ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)
 - k 熱伝導率 thermal conductivity ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)
 - ρ 密度 density ($kg\ m^{-3}$)
 - D 熱拡散 diffusivity ($m^2\ s^{-1}$)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{k}{C\rho} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$$

$$D = \frac{k}{c\rho}$$

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 15

ロッドの伸び

- ロッドの伸び
 - α 熱膨張係数 expansion coefficient (K^{-1})
 - q 単位断面あたりの熱量 $W\ m^{-2}$
 - l ロッドの長さ (m)
 - Δl ロッドの伸び (m)
 - αk 熱膨張 $m\ W^{-1}$

$$\Delta l = \alpha \frac{\theta}{2} l = \frac{ql^2}{2} \cdot \frac{\alpha}{k}$$

$$q = \frac{k\theta}{l}$$

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 16

パラメータマップ1: 熱膨張/熱拡散

Figure 4.31 Thermal expansion vs. thermal diffusivity

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 17

材料の種類

Chemical	Microscopic	Macroscopic	Macroscopic
Al	Aluminum	Al ₂ O ₃	Aluminum Oxide (Ceramic)
Si	Silicon	SiC	SiC (Ceramic)
SiO ₂	Silica	SiO ₂	Quartz (Ceramic)
SiC	Silicon Carbide	SiC	Silicon Carbide (Ceramic)
Si ₃ N ₄	Silicon Nitride	Si ₃ N ₄	Silicon Nitride (Ceramic)
Si	Silicon	Si	Silicon (Semiconductor)
Si	Silicon	Si	Silicon (Semiconductor)
Si	Silicon	Si	Silicon (Semiconductor)
Si	Silicon	Si	Silicon (Semiconductor)
Si	Silicon	Si	Silicon (Semiconductor)
Si	Silicon	Si	Silicon (Semiconductor)
Si	Silicon	Si	Silicon (Semiconductor)

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 18

強さ, 振動

- はりのたわみ d
- 共振周波数 ω_n
 - E 弾性係数 modulus of elasticity (Pa)
 - ρ 密度 density (kg m^{-3})
 - E/ρ 比剛性 ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)

$$d \propto \frac{E}{\rho}$$

$$\omega_n \propto \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/2}$$

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 19

パラメータマップ2: 比剛性/熱拡散

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 20

パラメータマップ3: 比剛性/熱膨張

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 21

光計測

レーザ干渉計

レーザ干渉計

- レーザ干渉計
 - レーザ干渉計の原理と光学素子測定への応用
 - 日本工業出版 月刊「光アライアンス」2000年6月号
 - <http://www.toumeigiken.com/technology/alliance/alliance.htm>
 - 富士写真光機 齋藤 隆行
- 内容
 - はじめに
 - 干渉計とは?
 - 干渉計の読み方
 - 代表的な干渉計
 - フィソ 干渉計
 - マイケルソン干渉計
 - 斜入射干渉計
 - 干渉縞の数値解析
 - フリンジスキャン法
 - フーリエ変換法
 - 光学素子測定への応用
 - まとめ

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 23

干渉縞の読み方(2)

- 不等間隔同心円の干渉縞
 - 被検面は緩やかな球面
 - 同心円の中心が画面中心と一致していないので、参照面に対して被検面が少し傾いている
 - 干渉縞からだけでは、凹の球面か凸の球面かは分からない
 - 干渉縞の曲がり方から、平面度(平面からの外れ)を計算する
 - 干渉縞の間隔を a 、干渉縞の曲がり量を b : 平面度は $b/2a$ () またはニュートン換算で b/a (本)
 - 例えば、干渉縞の曲がり量が干渉縞間隔のちょうど半分の時 ($2b=a$ の時)、平面度 $1/4$ またはニュートン 0.5 と表現する。

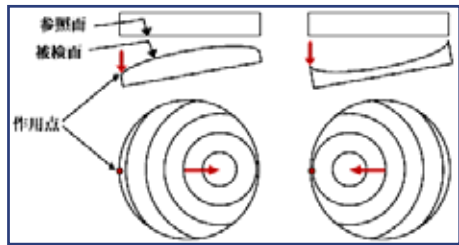
- 干渉縞のピッチ: a
- 干渉縞の曲がり量: b
- 平面度: $b/2 a$ ()
- ニュートン: b/a (本)

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 24

干渉縞の読み方(3)

■ 凹か凸か

- 被検面または参照面を少し傾け、干渉縞の動く方向を調べる
- 被検面の左側を参照面から離れる方向に傾けた時、干渉縞の中心が作用点から離れる方向(右側)に移動すれば凸面であり、作用点に近づく方向(左側)に移動すれば凹面である



2005/5/23

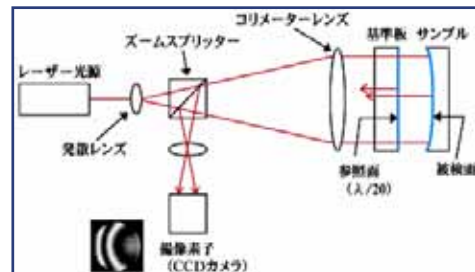
ナノメートル計測学2005年

25

フィゾー干渉計(1)

■ フィゾー干渉計

- レーザーを光源とする干渉計で、簡単な構成で高精度の平面測定、球面測定が行えるため、最も普及している干渉計である。
- 平面測定用フィゾー干渉計の光学系を示す。



2005/5/23

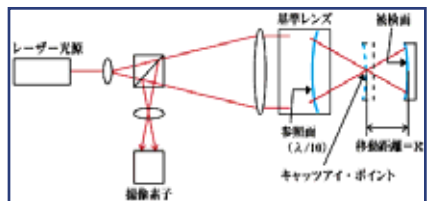
ナノメートル計測学2005年

26

フィゾー干渉計による球面の測定

■ 光学系

- 基準板の代わりに基準レンズを用いる
- 基準レンズは、その最終面が精度良く研磨された球面となっており、これが参照面となる
- 被検面の位置を調整し、参照面から出射した光が被検面に垂直に入射するようにすれば、被検面からの光がもと来た光路を逆戻りし、参照面からの反射光と干渉して、被検面の面形状を測定できる



2005/5/23

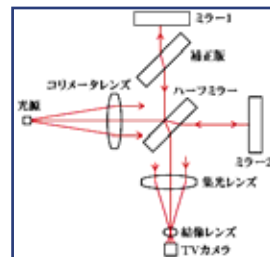
ナノメートル計測学2005年

27

マイケルソン干渉計(1)

■ 光学系

- 光源から出た光はコリメーターレンズにより平行光となり、ハーフミラーにより2つの光路に分割(振幅分割)
- 2つに分かれた光束はそれぞれミラー1、ミラー2で反射し、元の光路を逆戻りしてハーフミラーにより重ね合わせられ、TVカメラにより干渉縞画像が捉えられる。
- 一方のミラー(ミラー1)を高精度に研磨された平面(参照面)とし、他方(ミラー2)を被検面とすれば、被検面の形状を測定することができる。



2005/5/23

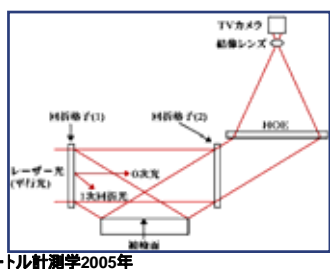
ナノメートル計測学2005年

28

斜入射干渉計(1)

■ 光学系

- 被検面に対して光が斜めに入射する干渉計を総称して斜入射干渉計と書く
- 斜め入射の場合には低感度となり、より大きな凹凸まで測定可能となる。
- 斜入射干渉計には、プリズムを使用する方式や回折格子を使用する方式がある



2005/5/23

ナノメートル計測学2005年

29

干渉縞の数値解析

■ 干渉縞写真

- 被検面の大ききな形状や平面度(あるいは球面度)が分かる
- 複雑な形の干渉縞の場合には専用の解析装置が必要である
- 干渉縞解析装置は、CCD上の干渉縞画像をコンピュータに取り込み、各点の光の位相を求め、形状を計算する装置である。
- 位相を求める方法には幾つかの方法があるが、ここではフリンジスキャン法とフーリエ変換法について簡単に解説する。

2005/5/23

ナノメートル計測学2005年

30

フリンジスキャン法(縞走査法)(1)

- 干渉縞
 - 明暗さが正弦波状に変化する
 - 着目する点の明暗さが分かれば、その点の初期位相が分かり、光路差(高さの情報)が得られる
 - 画面のシェーディングやノイズがあっても良い
- フリンジスキャン
 - 初期位相を正確に求めるために考案された方法
 - 参照面を光軸方向に少し移動すると干渉縞が変化して見える
 - 各点に注目すると明暗が周期的に変化する
 - 1周期分(2π)走査し、干渉縞がπ/2(1縞の1/4)走査される毎に4回画像を取り込む(4ステップ法)
 - これから、初期位相を計算する

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 31

フリンジスキャン法(縞走査法)(2)

- 初期位相
 - 干渉縞が p/2(1縞の1/4)走査される毎に4回画像を取り込んで(4ステップ法)
 - その明暗さの変化から初期位相を計算する。着目する点の明暗さが、 I_0, I_1, I_2, I_3 と変化した時、初期位相(ϕ)は、

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{I_3 - I_1}{I_0 - I_2} \right\}$$

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 32

フリンジスキャン法(縞走査法)(3)

- 位相接続 (phase unwrapping)
 - ϕ は $-\pi \sim \pi$ の間の値となるので、隣り合う点に 2π の位相飛びがある場合には、 2π を足したり引いたりして、位相を繋ぎ合わせる必要がある
 - この操作を位相接続(位相アンラップ)と言う
 - すべての点について ϕ を計算し、これらを繋ぎ合わせれば全体の位相が求まり、これを長さに換算すれば、形状を求めることができる

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 33

フーリエ変換法(1)

- フーリエ変換法
 - 電気通信大学の武田光夫先生が開発した。
 - 参照面あるいは被検面を少し傾けると傾きによる干渉縞が発生し、被検面の形状を表す干渉縞にキャリアとなる干渉縞を重ねることができ
 - この干渉縞画像を2次元フーリエ変換すると、被検面の情報を含む緩やかに変化する成分と、画像のバイアス成分(ノイズやシェーディング)をスペクトル分離する
 - 被検面の情報を含むスペクトルのみを取り出して空間周波数領域で原点に戻し、逆フーリエ変換すると被検面の位相情報を求めることができる
 - フーリエ変換法の場合も、求める位相は $-\pi \sim \pi$ の間の値であり、やはり位相接続を行う必要がある

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 34

フーリエ変換法(2)

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 35

フーリエ変換法(3)

- 歪んだ縞画像:
 - 空間搬送周波数 nf_0
 - 三次元形状を表す位相 $\phi(x, y)$
 - 表面の反射率を表す $r(x, y)$

$$g(x, y) = r(x, y) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp\{i[2\pi n f_0 x + n\phi(x, y)]\}$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_n(x, y) \cdot \exp(2\pi i n f_0 x)$$

$$G(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp(-2\pi i f x) dx = \sum_{n=-\infty}^{\infty} Q_n(f - n f_0, y)$$

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 36

フーリエ変換法(4)

- フーリエ変換する
 - 搬送周波数に対して、位相や反射率は低い周波数を持つ(ゆっくり変化する)
 - 搬送周波数を除去できる
- 位相の分離
 - 反射率の分布は実数部になる
 - 複素ログを取って分離できる

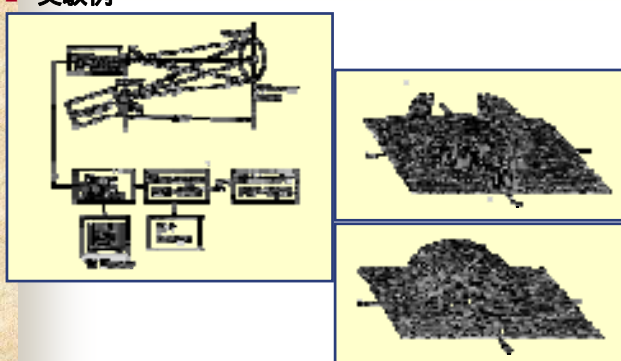
$$\hat{g}(x, y) \cdot \hat{g}_0(x, y) = |A_1|^2 r(x, y) \exp[i\{\Delta\phi(x, y)\}]$$

$$\log[\hat{g}(x, y) \cdot \hat{g}_0(x, y)] = \log[|A_1|^2 r(x, y)] + i\{\Delta\phi(x, y)\}$$

2005/5/23
ナノメートル計測学2005年
37

フーリエ変換法(5)

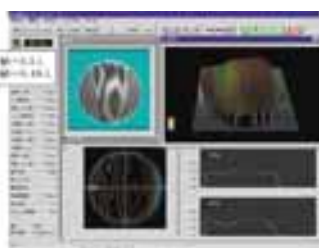
- 実験例



2005/5/23
ナノメートル計測学2005年
38

表面形状測定例

- フィゾー干渉計G102と顕微鏡装置A1によるガラス表面形状測定例を示す
 - 左上が干渉縞画像、右上が鳥瞰図、左下が等高線図、右下が断面図
 - フロートガラスを測定した例であり、表面が波打っている
 - P-V値: 測定範囲内の最も高い点(peak)と最も低い点(valley)の差
 - RMS値: (root mean square)とは標準偏差である



2005/5/23
ナノメートル計測学2005年
39

まとめ

- 形状測定装置としての干渉計
 - 干渉計は、研磨面であればガラスのみならず金属やプラスチック、セラミック等の表面形状(平面、球面、円筒面、回転2次曲面、非球面等)を測定可能
 - レンズの透過波面形状も簡単に測定することができる
 - 光学業界のみならず様々な分野で活躍している
 - カメラレンズ、コピー機用レンズ、ピックアップ用対物レンズをはじめとする光記録光学系用レンズ
 - 光通信用レンズ、コンタクトレンズ等、各種ガラス、プラスチックレンズの表面形状測定や透過波面形状測定
 - ミラー、フィルター、プリズム、液晶用ガラス、ガラスディスク、光記録光学系用ガラス部品
 - コーナーキューブ、ホログラム素子等、板物の表面形状測定や透過波面測定
 - 金属あるいはセラミック製シール部品表面、金属製電気部品、刃物、ギア、ボールベアリング表面等の各種メカ、電気部品の形状測定

2005/5/23
ナノメートル計測学2005年
40

波長可変レーザーを用いた形状測定

郭志徹, 高増潔
 東京大学工学系研究科
 理化学研究所3DFD開発チーム

2005/5/23
ナノメートル計測学2005年
41

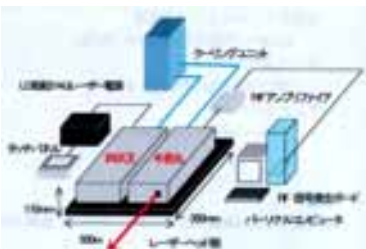

三次元形状デジタイジング



2005/5/23
ナノメートル計測学2005年
42

チタンサファイアレーザー「牛若丸システム」

- 仕様・性能
 - 出力波長: 700 ~ 1000 nm
 - 出力エネルギー: 40 mJ/pulse
 - パルス幅: 150 ns以下
 - スペクトル幅: 0.2 nm以下
 - ビーム径: 1 mm

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 43

Introduction

Interferometry	One Wavelength	Phase-Shift	White-Light	Wavelength Scanning
Object		○	○	○
		×	×	○
		×	×	○
Measurement	Relative	Relative	Absolute	Absolute
Mechanical Parts	Needless	Require	Require	Needless
Resolution	High	High	Middle	Low

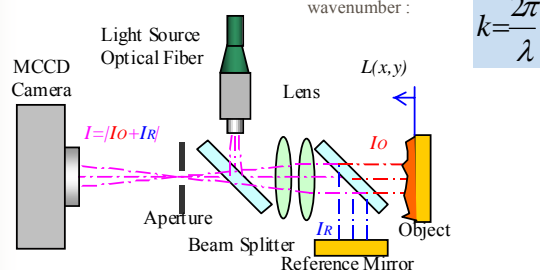
2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 44

Principle

- Photocurrent:

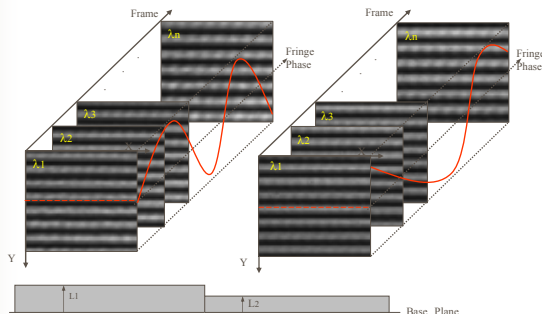
$$I(x, y, k) = I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos(2kL(x, y))$$

wavenumber: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$



2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 45

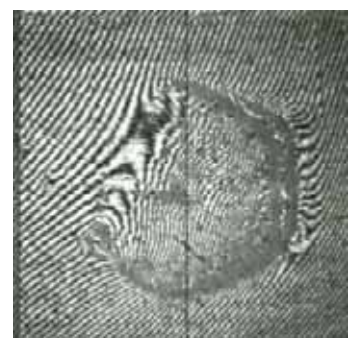
Wavelength Scanning Interferometry



2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 46

Experimental Result 2-1

- Measurement of a sample



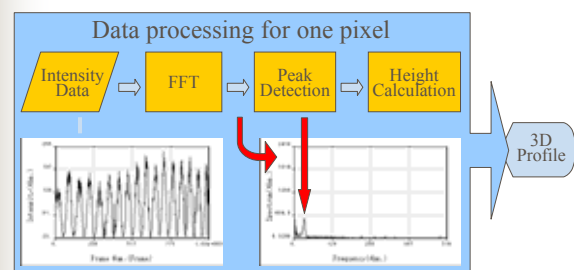
2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 47

Data Processing

Data processing for one pixel

```

    Intensity Data → FFT → Peak Detection → Height Calculation
    
```



2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 48

Light Source & Tunable Range

Light Source	Tunable Range	Resolution	Measurable Range(1024 frames)
Laser Diode	~0.1 nm	~3.6 mm	~1.8 m
Pigment Laser	~30 nm	~12 μm	~6.1 mm
LED / SLD+Spectroscope	~20 nm	~18 μm	~9.2 mm
Ti:Sapphire Laser	~100 nm	~3.0 μm	~1.5 mm

- Resolution**

$$\delta h = \frac{\pi}{\text{Max}(\Delta k)} = \frac{\lambda_{\text{max}} \cdot \lambda_{\text{min}}}{2(\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}})}$$
- Measurable Range**

$$\Delta h = \frac{\pi}{2\delta k} = \frac{N}{2} \delta h$$
- Optical path difference**

$$L = \delta h \cdot \frac{f}{f_s}$$

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 49

Experimental System

- Experimental setup**

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 50

Electronically Tuned Laser

- Tunable Range: 700 nm – 1000 nm**
- Power at 830 nm: 30 mW (1 kHz)**
- FWHM: 0.06 nm**
- Coherence Length: 5 mm**

AOTF:Acousto-Optic Tunable Filter
S.Wada et. Al, Opt. Lett. 21, p.731(1996)

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 51

Acousto-Optic Tunable Filter

S.Wada et. Al, Opt. Lett. 21, p.731(1996)

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 52

Experimental System

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 53

Experimental Conditions

- Wavelength Scanning Range :** 740.0 nm – 842.3 nm
- Sampling Speed :** 250 Frames/s
- Frame Size :** 256 X 128 X 4 Ports (256 X 512 Pixels) 1024 Frames (128MB)
- Measurable Area :** 2.5 X 5 mm²
- Depth Resolution :** 3.046 μm
- Measurable Range:** 1.56 mm

2005/5/23 ナノメートル計測学2005年 54

