半導体パルスレーザを用いた微小振動分布の縞走査干渉画像計測†

中 野 健*・吉 田 博 樹*・羽 根 一 博**
大 熊 繁*・江 口 正***

Fringe Scanning Interferometric Imaging of Small Vibration Using Pulsed Laser Diode

Ken NAKANO*, Hiroki YOSHIDA*, Kazuhiro HANE**,
Shigeru OKUMA* and Tadashi EGUCHI***

We propose the interferometric method of imaging micro-vibration by using a semiconductor pulsed laser diode. The Michelson interferometer was used to obtain stroboscopic interference image of the vibrating surface. The stroboscopic interference fringes were obtained with a vidicon camera. A micro-cantilever for an atomic force microscopy was used as a sample to demonstrate usefulness of the proposed technique. The micro-cantilever was excited by pressure of sound at a resonant frequency of 18.4 kHz. The measured interference fringes were analyzed by the phase-measurement method (fringe scanning method). By changing time delay for the laser pulse irradiation, vibrations of the micro-cantilever at different phases were obtained. The distribution of the vibration was visualized sequentially. The measurement error was calculated to be approximately 20 nm. The measured distribution of the vibration agreed well with the theoretical results calculated by the finite-element method. The method investigated in this paper will be useful for measuring micro vibrations of ultrasonic devices and micro-mechanical systems.

Key Words: pulsed laser, stroboscopic interference image, fringe scanning method, vibration measurement

1. はじめに

近年、産業界においてマイクロセンサ・アクチュエータの研究が盛んに進められている。この中には、振動周波数から力や変位を検出する振動型センサや、振動を利用して物体を駆動させる振動型アクチュエータがある。振動型センサとしては、マイクロカンチレバーを用いた圧力センサなどが提案され、実用化されている¹⁾。また、振動型アクチュエータとしては、従来から超音波モータに代表される超音波デバイスの開発がなされている²⁾。

これらのマイクロセンサ・アクチュエータの性能を評価するには、デバイス面全体の振動分布を時間的および空間的に調べる事が要求される。マイクロデバイスの表面に生じる振動の振幅は小さいもので数 nm 程度と非常に小さく、また周波数は高周波なもので数百 MHz に達する。

これまでに、微小領域における振動分布の光学的検出法がいくつか提案されている。光プローブを用いたレーザプローブ干渉法^{3),4)}は、一点における微小振動振幅および位相の検出に適しているが、微小振動の場合は検出器(ロックインアンプ)の応答性から測定可能周波数が数 MHz 程度と限られている。またおのおのの点に対して走査を行うため、測定領域全体の走査に時間を要する。

また、パルスレーザによるホログラフィ法^{5),6)}ではホログラムを利用することにより領域全体の振動分布を測定することが可能であるが、装置の構成が複雑となるため、微小振動を簡便に測定するには向いていない。

† 電気学会全国大会で発表(1994・3)

* 名古屋大学工学部 名古屋市千種区不老町

** 東北大学工学部 仙台市青葉区荒巻字青葉

*** キヤノン(株) 東京都大田区下丸子 3-30-2

* School of Engineering, Nagoya University, Nagoya

** Faculty of Engineering, Tohoku University, Sendai

*** Canon Incorporation, Ohta-ku, Tokyo

(Received May 12, 1994)

一方、静止した表面の微細な形状を画像計測する方法として縞走査法を用いた干渉顕微鏡が開発され、高い精度が実現されている⁷⁻⁹⁾。そこで、パルスレーザを用いて振動状態の干渉縞を静止状態と同様な干渉画像として得ることができれば、静止した表面の縞走査干渉画像計測法と同様に微小な振動変位を簡便に高精度で計測可能であると考えられる。これまでに、パルス YAG レーザを用いた低周波振動の測定法が提案されている¹⁰⁾。しかしながら、計測装置全体を小型化するには、光源は小型であることが望ましい。また、高周波振動の測定においては励起振動との高速同期を実現する必要がある。半導体レーザは小型で、レーザ発振と励起振動の高速同期が容易であるため、光源として適している。

本稿では、半導体パルスレーザをストロボ的に用いた微小振動分布の縞走査干渉画像計測法を提案し、第一段階としてマイケルソン干渉計を用いた光学系による実験装置の開発を行った。一例として原子間力顕微鏡用マイクロカンチレバーの振動測定を行い、本装置の有効性を示したので報告する。

2. パルスレーザ縞走査干渉画像計測法

2.1 干渉縞光強度

本計測法では、光源として半導体レーザを振動と同期させながらパルス発振させ、光学干渉計により振動物体の干渉画像を瞬時に得る(実験装置 Fig. 2 参照)。この手法は、瞬間写真撮影でストロボを用いるのに対応している。

正弦関数的に振動する試料表面上の一点 $Q(x, y)$ において、振動周波数を f とすると、時刻 t での振動は一般に $\sin 2\pi ft$ と時間に無関係な定数項(振動振幅)との積で表わされる。マイケルソン干渉計において、静止状態での試料面と参照面との光路差に相当する位相を $\theta_0(x, y)$ 、試料の振動によって変動する位相の振幅を $\theta(x, y)$ とすると、 $Q(x, y)$ における干渉光の位相 $\phi(x, y, t)$ は、
$$\phi(x, y, t) = \theta_0(x, y) + \theta(x, y) \sin 2\pi ft \quad (1)$$
 で与えられる。

参照面および試料面のエネルギー反射率をそれぞれ R_1, R_2 、レーザ光出力を $P(x, y, t)$ 、レーザビーム断面積を S 、光速を c とし、ハーフミラーで光が二分されることを考慮すると $Q(x, y)$ に対する干渉光強度 $I_r(x, y, t)$ は次式で与えられる。

$$I_r(x, y, t) = \frac{P}{8cS} (R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi) \quad (2)$$

時刻 $t_0 - \frac{t_w}{2} \leq t \leq t_0 + \frac{t_w}{2}$ の範囲でレーザをパルス幅 t_w で光出力 P_0 の矩形波パルスとして照射する場合、1 回

のパルス照射で検出器に取り込まれる光量の総和 $I_c(x, y, t_0)$ は次式で与えられる。

$$I_c(x, y, t_0) = \int_{t_0 - \frac{t_w}{2}}^{t_0 + \frac{t_w}{2}} c I_r(x, y, t) dt \\ = I_0 \{1 - \gamma \cos \phi(x, y, t_0)\} \quad (3)$$

ただし、

$$I_0(x, y) = \frac{P_0}{8S} t_w (R_1 + R_2) \quad (4)$$

$$\gamma(x, y, t_0) = \frac{2\sqrt{R_1 R_2}}{R_1 + R_2} \frac{\int_{t_0 - \frac{t_w}{2}}^{t_0 + \frac{t_w}{2}} \cos \phi dt}{t_w \cos \phi(x, y, t_0)} \quad (5)$$

したがって、一般的には干渉光のコントラスト γ はパルス幅 t_w と位相 ϕ との複雑な関数となる。

簡単な場合として、パルス幅 t_w が振動周期 T に対して十分小さい場合を考える。この場合、 $-\frac{t_w}{2} \leq t \leq \frac{t_w}{2}$ の範囲で $2\pi ft \ll 1$ であることから $\sin 2\pi ft \approx 2\pi ft$ 、 $\cos 2\pi ft \approx 1$ と近似できる。この条件の下で、(5)式は以下のようなになる。

$$\gamma(x, y, t_0) = \frac{2\sqrt{R_1 R_2}}{R_1 + R_2} \operatorname{sinc} \left(2\pi f \theta \frac{t_w}{2} \cos 2\pi f t_0 \right) \quad (6)$$

$t_w \ll T$ かつ $2\pi f \theta \frac{t_w}{2} \ll 1$ では $2\pi f \theta \frac{t_w}{2} \ll 1$ となるため、振動によるコントラスト低下は無視できる。したがって、(6)式はつぎのように近似できる。

$$\gamma(x, y) = \frac{2\sqrt{R_1 R_2}}{R_1 + R_2} \quad (7)$$

パルス幅が振動周期に対して十分小さい場合は、コントラスト γ は参照面および試料面のエネルギー反射率に依存する。

2.2 パルス照射での縞走査法

試料面の変位を光学干渉計により測定し、画像処理する方法として縞走査法がある¹¹⁾。縞走査法は、試料面と参照面との光路差を変化させながら干渉画像を数回撮影し、おのおのの画素に対して画像の輝度値を平均して試料面全体の振動振幅・位相を求める方法である。

レーザのパルス照射による、位置 $Q(x, y)$ での干渉画像の輝度値 $I_c(x, y, t_0)$ は(3)式で表わされる。レーザのパルス照射では連続光照射と比較して光量が減少するため、もとの干渉画像に含まれる光学的ノイズは相対的に増大する。そこで、位相を反転させた干渉画像をバックグラウンド画像として、もとの干渉画像との減算処理を行うことで直流ノイズ成分を除去できる。このとき、減算処理後の干渉画像の輝度値 $I_{cb}(x, y, t_0)$ は次式で与えられる。

$$I_{cb}(x, y, t_0) = -2I_0 \gamma \cos \phi(x, y, t_0) \quad (8)$$

縞走査法で位相を α_i ($i=1, 2, \dots$) シフトさせるとき、検出器で測定される輝度値 $I_i(x, y, t_0)$ は以下のようになる。

$$I_i(x, y, t_0) = -2I_0\gamma \cos\{\phi(x, y, t_0) + \alpha_i\} \quad (9)$$

試料面に対する位相 $\phi(x, y, t_0) = \theta_0 + \theta \sin 2\pi f t_0$ は、(9)式を用いて次式で表わされる。

$$\phi(x, y, t_0) = \tan^{-1} \frac{\sum_{i=1}^N I_i \sin \alpha_i}{\sum_{i=1}^N I_i \cos \alpha_i} \quad (10)$$

静止状態の試料に対して同様に縞走査法を適用すると、静止状態の光路差に対応する位相 θ_0 が得られる。振動による試料の変位に対する位相 $\theta \sin 2\pi f t_0$ を求めるには、試料の静止状態および振動状態のそれぞれについて位相を求め、これらの差を求めて θ_0 を消去する。

実際の変位量 $d(x, y, t_0)$ は、レーザ波長を λ とすると以下のようになる。

$$d(x, y, t_0) = \frac{\lambda}{4\pi} \theta \sin 2\pi f t_0 \quad (11)$$

レーザのパルス照射においては、パルス幅 t_w を短くするとコントラスト γ は大きくなるが、一方で I_0 は小さくなり、検出器に取り込まれる光量は減少する。本手法では、(8)式の $I_0\gamma$ が大きくなる条件で振動変位を測定する必要がある。この条件を見いだすため、(4)式および(5)式を用いて数値計算を行った。 $R_1=R_2$, $\theta=2\pi$ (振動振幅半波長), $t_0=0$ (振動速度最大) で振動周期 T に対するパルスデューティ比 t_w/T をパラメータとして $I_0\gamma(x, y, t_0)$ を求めた結果を Fig. 1 に示す。パルスデューティ比 8% 以下では $I_0\gamma$ はデューティ比に対し単調に増加する。また、8% 以上のデューティ比では $I_0\gamma$ は振動しながら徐々に増加するが、コントラスト γ は減少する。したがって、デューティ比 8% 程度のパルス幅でレーザを照射すれば良い。1 回のパルス照射では干渉光の光量が測定に不十分である場合には、試料面の振動に同期させて繰り返しパルス照射し、計測に必要な光量を

Fig. 1 Interferometric intensity for the irradiation of the rectangular pulsed laser light as a function of the pulse width

得る必要がある。

本研究では、縞走査法として 5-Bucket 法を用いた¹¹⁾。

(10)式において $\alpha_i = \frac{2\pi(i-1)}{5}$ ($i=1, 2, 3, 4, 5$) であり、5 枚の干渉画像を使用する。5-Bucket 法では、3 次以下の非線形特性を示す検出器に対し測定誤差が少ないという利点がある。本装置で用いる検出器には非線形特性があるため、5-Bucket 法による処理が有効であると考えられる。

3. 実験装置

半導体パルスレーザを光源とした縞走査干渉画像計測法の有効性を確認するため、結像光学系で構成される画像計測装置の開発を行った。装置の概略を Fig. 2 に示す。

光学系はマイケルソン干渉計で構成される。ハーフミラーで光路が試料面側と参照面側に分けられ、参照面側の光量は ND フィルタで調整される。試料面側は単レンズ ($f=20$ cm) および対物レンズ (20 倍) による結像系 (倍率 300 倍) である。参照面には PZT が取り付けられ、バックグラウンド画像の撮影および縞走査法による位相シフトの際に、計算機からの信号で PZT を駆動させて参照面側の光路長を変えることができる。各面で反射した光は再びハーフミラーに戻り、その結果干渉縞が画像として得られる。

光源には赤色半導体レーザ ((株)日立, HL 6712 MG, 波長 670 nm, 出力 5 mW) を使用した。振動に同期した矩形波パルス信号をレーザに印加し、レーザをパルス発振させる。レーザ駆動回路でのパルス信号入力段は 50 Ω で終端されている。パルス信号の生成にはパルスジェネレータ (ヒューレットパッカード社, HP 8130 A) を用いた。パルス信号のパルス幅は 1.5 ns~99.9 ms の範囲で設定可能であり、またパルスの遷移時間は 670 ps である。

今回、提案する測定法の有効性を確かめるため、試料

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

には原子間力顕微鏡(AFM)用のマイクロカンチレバー(PSI社, 材質 Si_3N_4 , 長さ $173\text{ }\mu\text{m}$, 厚さ $0.6\text{ }\mu\text{m}$, 共振周波数 18.4 kHz)を用いた。試料はリソグラフィ加工によるマイクロマシーニングにより作製されている。形状はV字形である。マイクロカンチレバーの動特性は, AFMの基礎データとしても重要である^{12), 13)}。

マイクロカンチレバーは超音波により振動励起した。超音波振動源として圧電振動子(厚さ 1.2 mm , 直径 13.3 mm)を用いる。発振器(NF, 1920 A)から正弦波信号を出力し, パワーアンプ(NF, 4010)で増幅して圧電振動子に正弦波信号を印加する。発振器から正弦波信号と同期した TTL レベルのパルス信号を出力し, パルスジェネレータにトリガ信号を入力することにより, レーザのパルス発振と試料の振動を同期させる。パルスジェネレータへのトリガ信号入力に対しパルス出力を最大 99.9 ms の範囲で任意に遅延させることで, 異なる振動位相に対する試料の振動分布が測定可能である。

試料の振動による干渉画像は $1/30$ 秒間隔でビジコンカメラ(浜松ホトニクス(株), C 2741-03)で撮影され, フレームメモリ(浜松ホトニクス(株), DVS-3000)に格納される。フレームメモリは, メインメモリ (640×485 画素 $\times 16$ ビット) 1面とバックグラウンド演算処理用メモリ (640×485 画素 $\times 8$ ビット) 1面をもち, バックグラウンド画像減算および画像積算によるノイズ除去処理が可能である。

装置全体の制御は計算機(NEC, PC-98 XL)を用いて行う。また, フレームメモリへの画像データ転送や画像

処理, および参照面の PZT による駆動を合せて行う。縞走査法による画像解析はワークステーション(Sun, SP/2)で行う。

4. 実験結果および考察

共振周波数 18.4 kHz で試料を振動させて振動分布の測定を行った。本実験における半導体レーザの注入電流は 42 mA , 出力は 3 mW , パルス幅は 543 ns である。位相反転画像を用いてバックグラウンド減算処理を行った後に干渉画像を得た。得られた干渉画像の一例を **Photo. 1** に示す。フレームメモリ上での画像積算回数は 45 回である。V 字形のカンチレバー部分に明瞭な干渉縞が得られている。連続光照射で撮影すると試料の変位に

Photo. 1 Interferometric image of micro-cantilever. The phase angle is 225° and the voltage of the piezoelectric vibrator is 120 V , respectively

Fig. 3 Distribution of the vibration measured at the phase angles of (a) 45° , (b) 135° , (c) 225° and (d) 315° . The voltage of the piezoelectric vibrator is 120 V . The sample used in the measurement in the micro-cantilever of the atomic force microscopy

より干渉縞は得られなかった。

振動とレーザのパルス照射との同期位相を $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲で順次変化させて Photo. 1 と同様の干渉画像を測定した。得られる干渉画像から縞走査法によりカンチレバーの振動分布を求めた。結果の一例を Fig. 3(a) ~ (d) に示す。Fig. 3(a) では振動によりカンチレバーが下方にたわみ、(b), (d) ではカンチレバーが水平になっている状態である。また、(c) ではカンチレバーが上方にたわむ様子がわかる。これらの結果から、本計測法により任意の位相における振動変位の分布が測定できることが示された。

位相を順次変化させ、圧電振動子の印加電圧 120 V で振動励起を行った場合のカンチレバーチップ先端部の振動変位を Fig. 4 に示す。本計測法によりカンチレバー先端部の変位が正弦的变化を示す様子が確認できる。このときのカンチレバーの振動振幅は最大約 300 nm である。

また、位相一定で振動振幅を順次変化させた場合の振動分布の解析結果を Fig. 5(a) ~ (c) に示す。圧電振動子の印加電圧 80 V の場合にはカンチレバーの振動振幅は約 200 nm となり、また印加電圧 40 V ではカンチレバーの振動振幅は約 100 nm となる。Fig. 5(a) ~ (c) で得られた振動振幅は、0 V ~ 120 V の範囲の印加電圧に対して直線的に比例した。

実験により測定された振動分布が正しいかどうかを確かめるため、試料として用いたマイクロカンチレバーの振動変位分布を有限要素法により解析した。カンチレバーの先端部に $1 \mu\text{m}$ の振動変位が生じる場合について、要素に分割してカンチレバー全体の変位分布を調べた。変位分布の解析結果を Fig. 6 に示す。カンチレバーの長さ方向に対する振動変位を先端部の変位量に対して正規化し、有限要素法による理論値と縞走査法による実際の計測結果と比較すると Fig. 7 となる。縞走査法によ

Fig. 4 Vibrational displacement of the micro-cantilever at the free end of the cantilever as a function of the phase angle from 0° to 360° . The voltage of the piezoelectric vibrator is 120 V

る測定結果は、FEM による理論結果と比較して根元のたわみは若干大きく、先端部のたわみはやや少ない傾向にあるが、カンチレバー全体のたわみ形状は両者で良く一致していることがわかる。

カンチレバーの長さ方向の位置に対する振動変位の測定誤差(データのばらつき)を Fig. 8 に示す。本計測法の測定精度を評価するため、縞走査法の解析結果を最小二乗法で近似し、近似曲線からのずれをデータのばらつきとした。測定条件は周波数 18.4 kHz, 振動源の印加電圧

(a) Voltage 120 V

(b) Voltage 80 V

(c) Voltage 40 V

Fig. 5 Distribution of the vibration measured at the voltages of piezoelectric vibrator of (a) 120 V, (b) 80 V and (c) 40 V. The phase angle is 225°

Fig. 6 Distribution of the vibration calculated by FEM

Fig. 7 Displacement of micro-cantilever as a function of the position along the length of the cantilever. The circle and solid line show the measured results and the results calculated by FEM, respectively

120 V, レーザ照射のパルス幅 543 ns, 同期位相 225°, 画像加算回数 45 回である。この場合の振動変位の測定誤差は最大で約 20 nm である。これはレーザ波長 (670 nm) の 1/33 に相当する。同様に、振動源の印加電圧が 80 V および 40 V の場合においても振動変位の測定誤差は最大で約 20 nm であった。このことから、パルス幅 543 ns の場合では振動変位が 100 nm 以上の試料に対する振動分布の測定精度は 20 nm 程度であるといえる。

また、レーザ照射のパルス幅 100 ns, 画像加算回数 60 回とし、ほかの条件を Fig. 8 の場合と同一にして計測したカンチレバーの長さ方向の位置に対する振動変位の測定誤差は最大で約 40 nm であり、パルス幅 543 ns の場合よりも測定精度は悪化した。この原因は、パルス幅の狭小化に伴いビジコンカメラに取り込まれる光量が減少するためと考えられる。

本実験ではレーザ照射のパルス幅は数百 ns であり、これはレーザのパルス遷移時間 (670 ps) よりも十分大きい。ため、レーザ発振中の光出力は一定とみなすことができる。この場合、十分に干渉画像の光量が得られるパルス幅 (1/100 程度) で計測を行うことにより微小振動分布を高精度に測定することができる。しかし、高周波振動の計測ではパルス幅を狭小化する必要がある、この場合のレーザ出力およびレーザ波長は一定ではなくなる。これに対しては、パルス応答性の高い半導体レーザを使用することや、コントラストの低い画像に対して画像処理法を改良することが有効であると考えられる。

5. 結 論

微小振動の簡便な測定法として半導体パルスレーザを用いた縞走査干渉画像計測法を提案し、マイケルソン干渉計を用いた実験装置を開発した。本装置を用いて、マイクロカンチレバーの超音波励起振動の分布を計測した。その結果、各時刻における振動状態を干渉画像の形

Fig. 8 Error of the vibration measured as a function of the position along the length of the cantilever. The phase angle is 225° and the voltage of the piezoelectric vibrator is 120 V

で計測可能であることを示した。縞走査法を用いて得られる振動分布は、有限要素法で得られる理論値とほぼ一致した。周波数が数十 kHz, 振動振幅が数百 nm の振動に対して、振動変位の測定精度は約 20 nm であった。以上より、微小振動に対して、半導体パルスレーザを用いた干渉画像計測法の有効性が示された。

参 考 文 献

- 1) 杉山, 五十嵐: 機械量センサ, 精密, 54-9, 19/23 (1988)
- 2) T. Ishii, K. Ohnishi and S. Ueda: Characteristics of a Bidirectional Rotary Ultrasonic Motor Using Obliquely Polarized Piezoelectric Transducers, Jpn. J. Appl. Phys., 32-5 B, 2399/2401 (1993)
- 3) K. Yoneda, M. Tawata and S. Hattori: Laser Probe for Surface Acoustic Wave Measurements, Jpn. J. Appl. Phys., 20-3, 61/64 (1981)
- 4) D. Royer and E. Dieulesaint: Optical Probing of the Mechanical Impulse Response of a Transducer, Appl. Phys. Lett., 49-27, 1056/1058 (1986)
- 5) M. Kujawinska and D. W. Robinson: Multichannel Phase-stepped Holographic Interferometry, Appl. Opt., 27-2, 312/320 (1988)
- 6) K. A. Stetson and W. R. Brohinsky: Fringe-shifting Technique for Numerical Analysis of Time-average Holograms of Vibrating Objects, J. Opt. Soc. Am., 5-9, 1472/1476 (1988)
- 7) S. Nakadake and H. Saito: Fringe Scanning Speckle-Pattern Interferometry, Appl. Opt., 24-14, 2172/2180 (1985)
- 8) K. Creath: Phase-shifting Speckle Interferometry, Appl. Opt., 24-18, 3053/3058 (1985)
- 9) K. Creath and J. C. Wyant: Interferometric Measurement of the Roughness of Machined Parts, SPIE vol. 954 Optical Testing and Metrology II, 246/251 (1988)
- 10) O. Y. Kwon, D. M. Shough and R. A. Williams: Stroboscopic Phase-shifting Interferometry, Opt. Lett., 12-11, 855/857 (1987)
- 11) K. Creath: Phase-measurement Interferometry, in Progress in Optics, vol. XXVI, edited by E. Wolf, 349/393, Elsevier, Amsterdam (1988)
- 12) Y. Martin, C. C. Williams and H. K. Wickramasinghe: Atomic Force Microscope-force Mapping and Profiling on a sub 100-Å scale, J. Appl. Phys., 61-10, 4723/4729 (1987)

- 13) Y. Martin and H. K. Wickramasinghe: Magnetic Imaging by "Force Microscopy" with 1000 Å Resolution, Appl. Phys. Lett., 50-20, 1455/1457 (1987)

=====

[著者紹介]

中野 健 (学生会員)

1994年,名古屋大学大学院工学研究科修士課程電子機械工学専攻修了。同年同大学院工学研究科修士課程進学,現在に至る。光計測およびマイクロマシンに関する研究に従事。

吉田 博 樹

1993年,名古屋大学工学部電子機械工学科卒業。同年同大学大学院工学研究科修士課程進学,現在に至る。光計測に関する研究に従事。

羽根 一 博

1983年,名古屋大学工学研究科修士課程修了。同年同大学工学部電子機械工学科助手。90年同助教授。94年東北大学工学部機械電子工学科教授。レーザ,光計測,走査型プローブ顕微鏡の研究に従事(工学博士)。

大 熊 繁 (正会員)

1972年,名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。74年ケース・ウェスタン・リザーブ大学大学院修士課程システム工学専攻修了。77年名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。同年同大学工学部助手。84年同助教授を経て90年同教授,現在に至る。この間,ロボティクスとパワーエレクトロニクスの研究に従事(工学博士)。

江 口 正

1986年,静岡大学工学研究科修士課程修了。同年テルモ(株)勤務。88年キャノン(株)勤務。同年~90年レーザーロータリーエンコーダの開発に従事。91年~SAW素子の開発に従事。

=====