

研究

空間フィルタ検出器を用いた光ファイバ干渉温度センサー

村上 卓也*・山口 一郎**

* 大倉電気(株)和光技術センター 〒351-01 和光市白子 2-9-20

** 理化学研究所光学計測研究室 〒351-01 和光市広沢 2-1

(1987年12月19日受理)

Fiber Interferometric Temperature Sensor Using a Spatial Filtering Detector

Takuya MURAKAMI* and Ichiro YAMAGUCHI**

* Ohkura Electric Co. Ltd., 2-9-20, Shirako, Wako 351-01

** Institute of Physical and Chemical Research, 2-1, Hirosawa, Wako 351-01

An optical fiber interferometer of Mach-Zehnder type has been constructed for temperature measurement, and investigated on sensitivity and fluctuation properties of its output signals. Interference fringe shift caused by change in optical path length induced by temperature change is directly transformed to voltage signal by means of a spatial filtering detector with an electronic scanning facility. Temperature sensitivity, which was derived by fitting lines on the experimental curve, showed dependences on the range of temperature variation and was 60.8 fringe/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}$ in the range between 25 and 45°C and 68.6 fringe/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}$ in the range between 6 and 25°C. Resolution, which was dependent on the rate of temperature change, was about $10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1. 序論

耐電磁誘導、防爆性、可撓性、軽量等の特長を有する光ファイバを利用して、各種の方法で温度測定が行なわれている。このうち光強度の変化を利用するものとして、温度に依存する螢光、吸収、散乱、放射などの変化を検出する方法¹⁻⁴⁾があるが、一般に、これらの温度分解能は $\pm 1\%$ 程度のものが多い。これに対し、干渉を利用して媒質の屈折率変化や熱膨張を検出する方法は、より高い分解能の温度測定に有効であることがよく知られている。とくに、光ファイバ自体をセンサーとする、いわゆる機能型光ファイバ温度センサーとして、フィゾー型、ファブリ・ペロー型、マッハ・ツェンダー型、偏光干渉型など、種々の干渉光学系が提案されている⁵⁻⁸⁾。

光ファイバの伝送特性の温度依存性をこれら干渉計で検出することにより、最高 $10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度の温度分解能で、高感度かつ高速応答の測定が報告されている。この場合、得られる干渉縞の位相変化すなわち移動を符号も含めて高い分解能で検出する必要がある。そのために、た

とえばゼーマン 2 周波レーザーなどによるヘテロダイン干渉法⁹⁾ や、ピエゾ素子などにより適当な光路変化を与える位相変調法¹⁰⁾などが有効とされている。しかし、それらは縞の移動の検出に変調や特殊な信号処理を必要とし、必ずしも簡単に構成できない。

この縞の移動の検出に適したデバイスの一つとして空間フィルタ検出器がある¹¹⁾。とくに、電子走査型空間フィルタ検出器を用いると、粗面の散乱光の干渉により生ずるスペックル・パターンの移動を実時間で検出して、粗面の変位、歪および振動の測定を行なうことができる¹²⁾。この場合、スペックル移動に比例する電圧が直接得られる。しかし、スペックルの形状および分布が不規則であるために、検出器出力がときどき消失するという本質的な問題があった。

本研究では、この信号消失が生じない規則的なパターンとして、マッハ・ツェンダー型光ファイバ干渉計から出力されるヤング縞を選び、その移動の検出に空間フィルタ検出器を適用することを考えた。これにより、縞検出系の簡素化と時間応答の向上ができる。本

干渉計を温度センサーとして使用し、その感度および外乱の検討を行なった。

2. 装置と方法

2.1 光学系

Fig. 1 に実験で用いたマッハ・ツェンダー型光ファイバ干渉計を示す。He-Ne レーザー光 (波長 633 nm, 出力 5 mW) をビーム・スプリッタで分割し、顕微鏡対物レンズを通して、互いに長さの等しい 2 本の単一モード光ファイバ (長さ 10 m) に入射させ、出射端を平行に並べてヤング縞を得る (各光ファイバからの出力 200 nW)。このヤング縞の方向とピッチは空間フィルタ検出器のそれに合致させる。各光ファイバの一部は、互いに別の位置で同じ長さ (5 m) だけループ状 ($60 \text{ mm} \phi$) に巻いてあり、それぞれをセンサー部および参照部としている。また、残りの部分は両光ファイバをビニールテープで巻いて密着させている。このように、

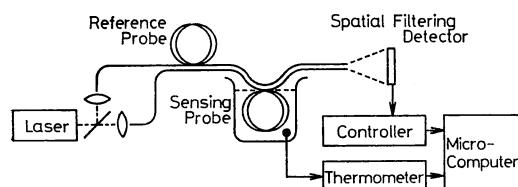


Fig. 1 Optical fiber interferometer of Mach-Zehnder type for temperature measurement.

光ファイバの長さを同じにすることによって、レーザーの波長変動の影響を抑制し、残りを密着させることによって、伝送路からの外乱を抑制し、測温部を限定している。

センサー部と参照部との間に温度変化が生じると、両光ファイバ間の光路差が変化し、結果的にヤング縞が移動する。この移動量は、空間フィルタ検出器によって正弦波信号の位相変化に変換され、それが後段の信号処理回路で検出されて、移動量に比例した電圧となってマイクロコンピュータに取り込まれる。

2.2 空間フィルタ検出器

使用した電子走査型空間フィルタ検出器を **Fig. 2** に示す。一列に並んだ 128 本のフォトダイオード (幅 20 μm , 長さ 5.12 mm, ピッチ 40 μm) を、各 8 素子おきに結線して、そのとき得られる互いに位置のずれた、ピッチ 320 μm の、8 組の櫛型検出器の出力の間の接続を、シフトレジスタにより同図に示すタイミングチャートに従って順次切り替えている。これにより、単独の櫛型検出器すなわち従来の空間フィルタ検出器が等価的に一定速度で移動することになる。したがって、検出器上に空間フィルタ検出器と同じ方向とピッチをもつ周期パターンが静止しているとき、出力にはシフトレジスタの切替え周期で決まる一定周波数 (62.5 kHz) の正弦波信号が現われ、パターンが移動すると、それに比例して信号の位相が変化する。すなわち、正弦波信号を搬送波とし

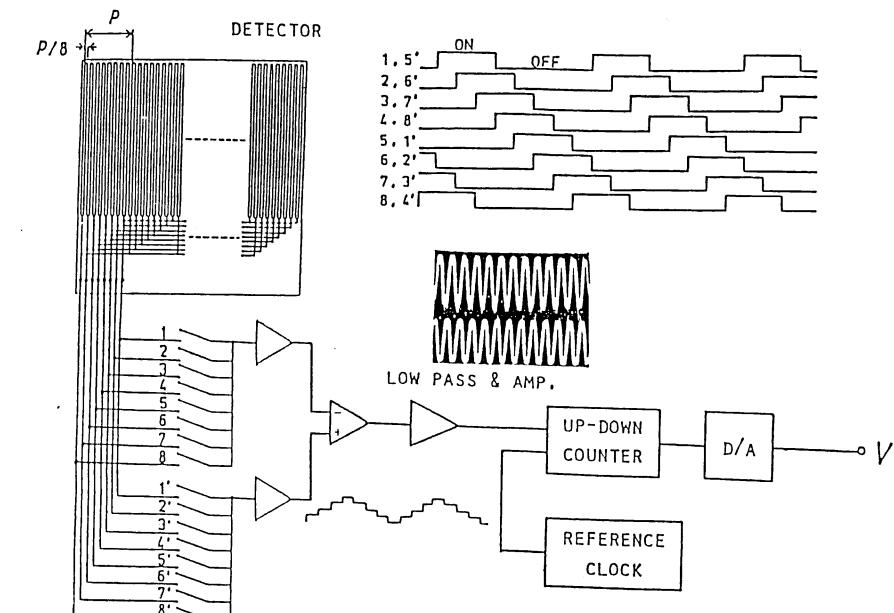


Fig. 2 Spatial filtering detector with an electronic scanning facility and block schematic of phase detection.

て、その位相がパターンの移動で変調されることになる。位相変化を求めるには、この信号をアップ・ダウンカウンタを中心とする信号処理回路によって、基準正弦波信号と比較する。こうして 2π 以内および 2π を越える位相変化と符号を容易に検出することができ、最終的に、縞の移動量に比例した電圧が直接得られる。ただし、正弦波信号の直流分を除去するために、上記の橋型検出器に対し位相が π ずれたもう一つの検出器を同時に走らせ、各出力間の差動増幅を行なっている。

干涉縞と空間フィルタ検出器の方向とピッチとを正確に合致させるには、干渉縞が移動する際に、上記の正弦波信号の振幅が一定となるように調整すれば良い。こうして得られる縞の移動の検出感度は 160 mV/fringe、応答速度は 20 kHz である。

3. 水温の測定実験

3.1 温度感度

参照部を氷水（2l）中に固定して 0°C に保ち、センサー部をビーカー内の水（200 ml）に入れて、水の温度変化に伴う縞の移動を観測した。同時に、比較のためにヒューレット・パッカード製水晶温度計を分解能 10^{-3} °C で使用し、温度を測定した。この際、センサー部はそのループをビーカーの底に固定しており、水晶温度計はループの中央に位置している。Fig. 3 は、室温下に放置した水の温度が 45°C から 25°C まで降下したときの、温度変化と縞の移動の時間経過を示す。放熱によって指

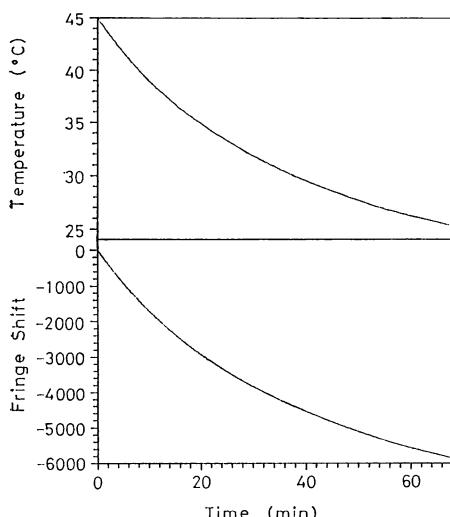


Fig. 3 Temperature fall of water (upper) and fringe shift (lower) varying exponentially as time passes.

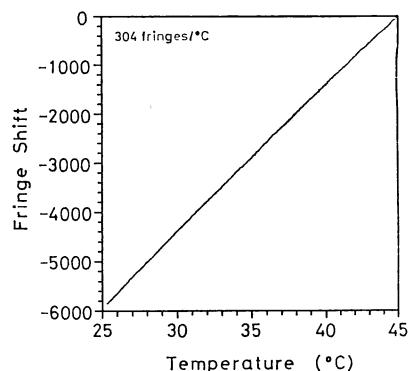


Fig. 4 Fringe shift vs temperature change.

数関数的に変化する温度を、本干渉計は忠実に検出していることがわかる。

Fig. 4 は、同じ温度範囲での温度変化と縞移動の関係である。これに直線をあてはめたとき、得られる温度感度は $60.8 \text{ fringe}/\text{°C} \cdot \text{m}$ となる。しかし Fig. 4 は直線ではなく厳密には上に凸の曲線であり、その直線に対する偏差は $\pm 5.8 \text{ fringe}/\text{m}$ となっている。したがって、異なる温度範囲では感度も異なり、たとえば 6°C から 25°C に昇温させたときには、感度 $68.6 \text{ fringe}/\text{°C} \cdot \text{m}$ 、偏差 $\pm 5.9 \text{ fringe}/\text{m}$ の値が得られている。

3.2 温度分解能

時間経過に伴う微小な温度変化を観測したのが Fig. 5 である。水温が 5 分間に 25.05°C から 0.04°C 降下する間に、縞はおよそ 10 fringe ほど移動している。上図の水晶温度計の変化が階段状であるのは、使用した分解

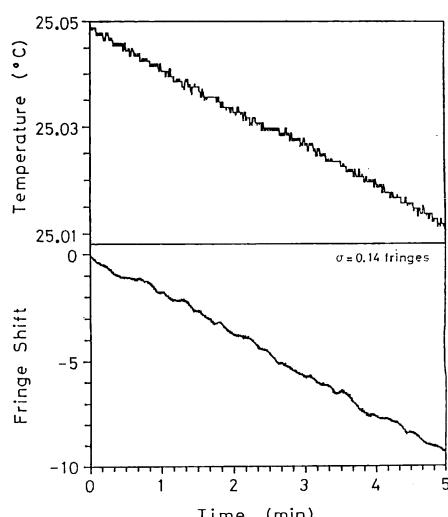


Fig. 5 Magnified variations in temperature fall (upper) and fringe shift (lower).

能 10^{-3}C の限界となっているためである。温度変化に重なって現れているゆらぎを無視すれば、下図に示す本干渉計の温度分解能はさらに高いことがわかる。ただし、空間フィルタ検出器による縞分解能は信号処理回路で決まり 10^{-2} fringe と考えられ、このまま温度分解能に換算すると、光ファイバ長 5 m について、 10^{-5}C 程度となる。しかし、つぎに述べるように、実際の温度分解能はゆらぎに大きく制限される。

Fig. 3 の縞の移動の様子を各部分について拡大し、その変動分だけを得ると **Fig. 6** の様子が見られる。これは温度変化に伴う水の対流の影響によるものと思われる。図において、温度変化と同様に温度変化の速度も指数関数にしたがって減少しており、 45°C で変化速度 $0.94^\circ\text{C}/\text{min}$ であったのが、 30°C では $0.26^\circ\text{C}/\text{min}$ となっている。同時に、変動分の振幅の標準偏差も 0.76 fringe から 0.25 fringe へと小さくなっている。すなわち、温度変化が緩やかになるほど変動の振幅は小さくなる。センサー部の光ファイバ長が 5 m の場合に、これらの出力変動分から本干渉計の温度分解能を換算すると 10^{-3}C 程度となる。

Fig. 7 は、**Fig. 3** に示す温度変化と縞の移動との差

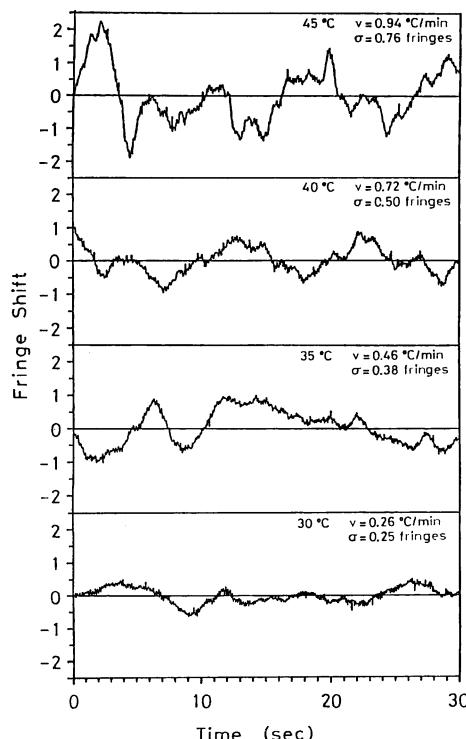


Fig. 6 Fluctuation components of fringe shift signals for various temperature change rates.

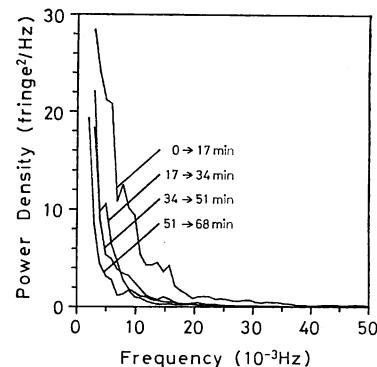


Fig. 7 Power spectra of fluctuation components.

異を縞の移動量に換算し、時間的に分割して、各部分の差の変動分をフーリエ変換して得たパワースペクトルである。変動周波数の幅は 10^{-2} 程度で、やはり温度変化の速度が減少するにしたがいスペクトルのすそは低周波側に移動している。

4. 計論

光ファイバの温度感度については、被覆の有無も含めて、すでに詳細な解析がなされている。そのうち比較的簡単な理論式⁷⁾に従って、理論感度 S を、温度変化 ΔT 当りの光路変化に対応する位相変化 $\Delta\phi$ とし、変化前の位相を $\phi = nL$ (n : コアの屈折率、 L : 光ファイバの長さ) として、つぎのように与える。

$$\begin{aligned} S &= \Delta\phi/\phi \Delta T \\ &= (1/n)dn/dT + \Delta n/n + \Delta L/L \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、つり合いの式を使って、コアに作用する応力を求め、光弾性効果の式を利用すると、最終的に次式が得られる⁷⁾。

$$\begin{aligned} S &= (1/n)dn/dT \\ &\quad + (n^2/2) \{(p_{11} + p_{12})\nu - p_{12}\} (\Delta L/L - \alpha) \\ &\quad + \Delta L/L \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 dn/dT はコアの屈折率温度係数、 p_{11} および p_{12} はコアの光弾性定数、 ν および α はそれぞれコアのポアソン比、線膨張係数である。

すなわち、感度には、(1)式第1項の温度によるコアの屈折率変化、第2項の熱応力による屈折率変化いわゆる光弾性効果および第3項の光ファイバ長さ方向の熱膨張率が関与する。光ファイバが被覆を有するときは、第3項の効果がもっとも大きく、理論感度の約9割はこれに依存する。ただし、(1)式からは波長と屈折率で正規化した値が得られるので、ここでは単位光ファイバ長および温度変化当りの縞の移動本数 ($= nS/\lambda$, λ : 波長) と

して感度を取り扱う。

実際に使用した単一モード光ファイバの各パラメータは、コアクラッド層、シリコン層、ナイロン層のそれについて、断面径が 125, 400, 900 μm , ヤング率が 730, 0.01, $5.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, 線膨張係数が 0.004, 2.5, 1 $\times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ である。また、 $n=1.462$, $dn/dT=1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, $p_{11}=0.121$, $p_{12}=0.270$, $\nu=0.17$ である。これら各パラメータから算出される理論感度 S は $2.7 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ となり、縞数に換算して 62 fringe/ $^\circ\text{C} \cdot \text{m}$ となる。

温度範囲 45~25°Cにおいて実験値と上記の理論値の温度感度は良く一致している。しかし、先の実験結果のとおり、実際の光ファイバの温度特性は厳密には非線形であり、感度は測定範囲に依存する。しかし、それが温度変化の方向、温度変化の速度、ループ径、測定位置によらないことは実験的に確かめている。したがって、非線形性は被覆の熱膨張率の温度依存性によるものと考えられる。理論値とのより詳細な比較には、この他にもコアの屈折率温度係数など、係数の温度依存性を考慮する必要があろう。上述の非線形性をさらに定量的に評価するため、範囲 45°C から 25°C での温度特性を別々の二次曲線で近似してみた。その結果は、一次係数がそれぞれ 48.6, 44.8 fringe/ $^\circ\text{C} \cdot \text{m}$, 二次係数が 0.2, 0.6 fringe $^2/^\circ\text{C} \cdot \text{m}$, 曲線からの偏差が ± 1.9 , 2.8 fringe/ $^\circ\text{C} \cdot \text{m}$ となった。この不一致は 3 次以上の影響が無視できないことを意味している。

Fig. 6 の出力変動は水の対流の影響によるもので、水中の不均一な温度分布の対流による時間変動と、対流による圧力および変位が、同時に光ファイバに生じているためと考えられる。ところで、同じ温度範囲にわたって、水晶温度計の指示と本干渉計の出力との差を計算したところ、縞の移動量に換算して標準偏差約 6 fringe の変動分を得た。これはおもに水晶温度計（プローブ径 10 mm）と本干渉計（ループ径 60 mm）のセンサー部の形状が異なるためと考えられる。本干渉計のセンサー部は大きく、その各点での温度分布が光センサー部のループにわたり空間的に平均化されるため、温度分布による出力変動は小さくなる⁸⁾。すなわち、上の変動分にはおもに水晶温度計の出力の変動が寄与しており、したがって、それは水晶温度計が位置する一点での対流による温度変動に近い値と思われる。この変動分に比べて、**Fig. 6** の変動は小さい。このように小さくなったのは変動が平均化されているためと考えられる。

その他の変動の原因として、光源の周波数変動、参照部の変動、他の機械的外乱などが考えられる。このう

ち、光源の変動の影響については、He-Ne のレーザーの周波数安定度が 10^{-6} 程度あるものとすれば、各光ファイバの長さは互いに数 mm 以内で合わせてあるので、上述の変動成分に比較して十分に小さい。機械的外乱は、一般に、その変動周波数が温度変化によるものに比べ大きいので、電気的なフィルタによって除去は可能と思われる。他方、参照部の変動については、ループ径が大きく、温度および機械的に安定を保つのはむずかしい。

5. 結 論

空間フィルタ検出器を光ファイバ干渉計に適用することによって、縞検出が簡素化され、また広いダイナミックレンジの測定および実時間測定が可能になった。さらに、検出器の受光面積が大きいので、微弱光量や低コントラストの干渉縞にとくに有効と思われる。

本実験で得られた温度感度は、25~45°C の範囲で 60.8 ± 2.2 fringe/ $^\circ\text{C} \cdot \text{m}$, 6~25°C の範囲で 68.6 ± 1.6 fringe/ $^\circ\text{C} \cdot \text{m}$ であり、また分解能は 10^{-3}C である。ただし、分解能は温度の変化速度に依存する出力変動により制限される。これはおもに水の対流による不均一な温度分布の時間変動と光ファイバが圧力や変化を受けることによるものと考えられる。

干渉型光ファイバ温度センサーの共通の問題として、本質的に空間積分型の測定であるために、測定箇所の同定がむずかしいことや、干渉計全体を温度および機械的に安定に保つのが困難なことなどが考えられる。また、光ファイバ自体が温度に対して非線形な伝送特性を持つので、温度感度は測定範囲によって異なり、相対変化を検出するこの種の干渉計では、初期温度を他の方法で求めない限り、出力変化を温度変化に正確に換算することはむずかしい。特性が線形と見なせる範囲に限定して使用する場合には、この手続きは不要であるが、ダイナミックレンジが制限されてしまう。しかしながら、本方法では小さい温度変化を高感度で容易に測定できるので、以上の干渉型光ファイバ温度センサーの問題点をある程度緩和することができると考えられる。とくに、高速で微小に変化する温度に対しては、従来の温度センサーにない特長が発揮されよう。

最後に、電子走査型空間フィルタ検出器と水晶温度計でたいへんお世話になった横河電機（株）研究開発一部の植田敏嗣、荻田英治の両氏に深く感謝する。

文 献

- 1) 渡 正博：“光ファイバ温度センサ”，計測と制御，24 (1985) 809-812.
- 2) K. T. V. Grattan, R. K. Sell and A. W. Palmer: "A miniaturised fluorescence referenced glass absorption thermometer," *Proc. of 4th Int. Conf. on OFS*, Tokyo (1986) pp. 315-318.
- 3) K. Kyuma, S. Tai, T. Sawada and M. Nunoshita: "Fiber-optic instrument for temperature measurement," IEEE J. Quantum Electron., QE-18 (1982) 676-679.
- 4) M. Bacci, M. Brenci, G. Conforti, R. Falciai, A. G. Mignani and A. M. Scheggi: "Thermochromic transducer optical fiber thermometer," Appl. Opt., 25 (1986) 1079-1082.
- 5) G. B. Hocker: "Fiber-optic sensing of pressure and temperature," Appl. Opt., 18 (1979) 1445-1448.
- 6) N. Lagakos, J. A. Bucaro and J. Jarzynski: "Temperature-induced optical phase shifts in fibers," Appl. Opt., 20 (1981) 2305-2308.
- 7) T. Yoshino, K. Kurosawa, K. Itoh and T. Ose: "Fiber-optic Fabry-Perot interferometer and its sensor applications," IEEE J. Quantum Electron., QE-18 (1982) 1624-1633.
- 8) T. Musha, J. Kamimura and M. Nakazawa: "Optical phase fluctuations thermally induced in a single-mode fiber," Appl. Opt., 21 (1982) 694-698.
- 9) 江口 正, 梅田倫弘, 山口十六夫: "戻り光の誘導変調による複合干渉計型ファイバーセンサー", 光学, 6 (1987) 258-262.
- 10) Y. Seki, K. Noda: "Pseudo-heterodyne, optical-fiber thermometer using Fabry-Perot interferometer," *Proc. of 4th Int. Conf. on OFS*, Tokyo (1986) pp. 227-230.
- 11) 小林 彰: "空間フィルターの進展", 応用物理, 52 (1983) 1007-1014.
- 12) I. Yamaguchi, T. Furukawa, T. Ueda and E. Ogita: "Accelerated laser speckle strain gauge," Opt. Eng., 25 (1986) 671-675.