

# 高精度光応用計測技術の開発(第9報)

## レーザダイオードの波長走査による位置計測技術の開発

廣川勝久, 門藤至宏, 古本浩章, 竹保義博<sup>\*1</sup>

### Noninvasive optical measurement for external, surface and internal structures IX

#### Interferometric measurement using spectrally modulated light

HIROKAWA Katsuhisa, MONDO Munehiro, FURUMOTO Hiroaki, and TAKEYASU Yoshihiro

We suggest the interferometric measurement system that is based on spectral scanning of laser diodes. The light emitted by the laser diode is employed as a light source of the Mickelson interferometer. Current is linearly injected into the laser diode to obtain the modulated spectrum. Relative distances of a sample mirror to a reference mirror are measured in terms of beat frequencies in the interferometer.

マイケルソン干渉計に入力するレーザ光の発振波長を線形的に走査することにより, 参照ミラーとの相対位置を計測するシステムを開発した。レーザ光の波長変調は, レーザダイオードの注入電流を変化させることにより行った。この光源をマイケルソン干渉計に用いた場合の, 反射面の位置とその位置に対するビート信号の関係を示す。

キーワード: 光計測, 波長変調, 注入電流, レーザダイオード

## 1. 緒 言

製造技術の急速な進歩に伴い, 製品の形状計測の分解能は年々高いものが求められている。特に, 大型製品は, 近年高い意匠性を持つことから, 正確な形状を計測するためには計測分解能に加え, 非常に多くの計測点を必要とする。また, 電子部品や光学部品については, 小型化が進み, これらの部品やその製造装置の部品などにも高精度な測定が必要とされている。光学的な形状計測は, 非接触, 高速, 空間並列性といった光の持つ特性を利用し, 計測物体の高速, 高精度, 高密度な計測が可能である。著者らは, これまでこのような非接触の光計測として, 計測物の大きさや測定精度に応じ, 光切断法, 共焦点顕微鏡, 干渉計測法に関する研究を行っている<sup>1-6)</sup>。

X線CTやMRIなど, 内部計測技術に関して, 最先端の研究を行っている医用・生体分野でも, 光計測を用いて生体内部の様々な情報を得るための研究が活発である。これは, 光学的な計測は生体に対して, 無侵襲かつ高精度な計測技術を提供するからである<sup>7-10)</sup>。工業分野においても, 無侵襲かつ高精度な光学的計測技術は利用価値が高いと考えられ, 塗装内部の錆検出や半導体製品の酸化膜計測への利用が始まっている<sup>11,12)</sup>。特に光干渉計測を物体内部の計測に用いることは, 反射情報に加え位置

情報も得られるため, 製品内部の欠陥検出, 厚み検査を, 製品を破壊することなくでき, 今後の工業利用に有効であると考えられる。

著者らは, これまでの光干渉計測研究で, 物体内部から戻ってくる信号光と参照光を重ね合わせる光断層画像計測法(Optical Coherence Tomography: OCT)を用い, 光計測法が物体の内部構造及び分光情報の同時計測に有効であることを示した<sup>4,13)</sup>。また, 近赤外光源を用いたOCTの光学特性などについても報告を行った<sup>6)</sup>。しかし, このようなコヒーレンスゲートによるOCTでは, 参照ミラーの位置を変化させ反射面の位置を測定するため, 参照ミラーの機械的な駆動部分があり, 高速化や振動などの問題がある。ミラーの機械的な駆動機構を伴わないOCTとしてこれまで, 広帯域光源を用いた分光による方式と, 波長走査による方式が提案されている。本研究では, 後者の方式を採用し, レーザダイオードの発振波長を時間的に走査することにより参照ミラーとの相対位置を測定するシステムの開発を試みたので報告する。

## 2. 測定の基本原理

### 2.1 光学系

波長走査型の計測光学系も, 従来のマイケルソン干渉計においてミラー部分の駆動しないものと同等である。

図1にその光学系を示す。ただし, 光源にはレーザダイオードのコヒーレンス光源を用いる。レーザダイオード

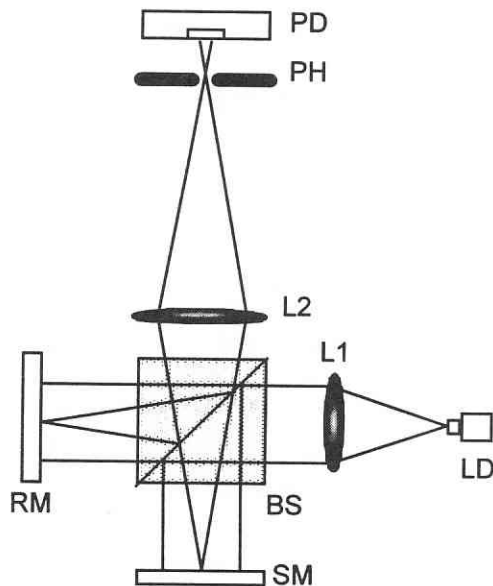


図1 マイケルソン光学系

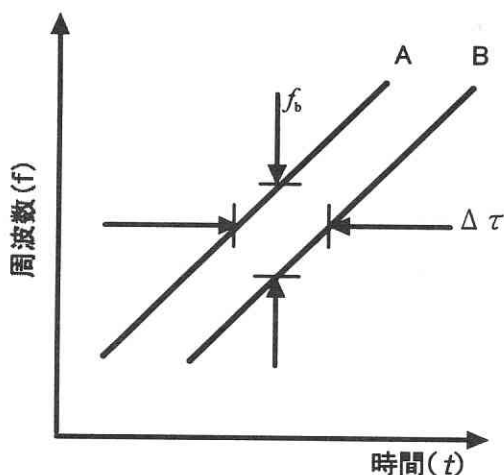


図2 波長走査とビート信号

(LD)から出た光は、レンズL1により平行光となりビームスプリッター (BS) に入射する。その後ビームスプリッターにより2分割され、参照ミラー (RM) とサンプルミラー (SM) に平行光として入射する。それぞれのミラーからの反射光はレンズL2によりピンホール (PH) に結像する。ピンホールを通過した干渉光はフォトディテクター (PD) により検出される。ピンホールは参照ミラーとサンプルミラー以外からの迷光を遮るために用いた。この光学系においてレーザダイオードの波長を線形に走査した場合、参照ミラーとサンプルミラーの光路差に応じたビート信号がフォトディテクターに検出される。

図2を用いて波長走査により発生するビート信号について述べる。今、直線Aのようにレーザダイオードの発振周波数を、時間的に変化させた場合を考える。もし、参照ミラーとサンプルミラーの光路差が無い場合、ホト

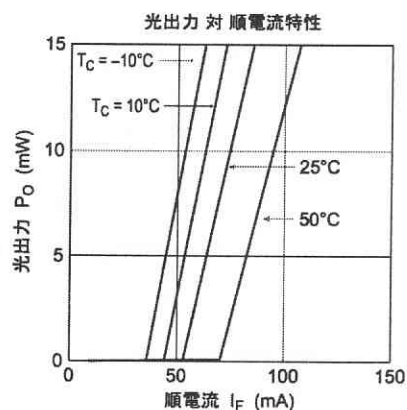


図3 レーザダイオードの駆動電流と出力

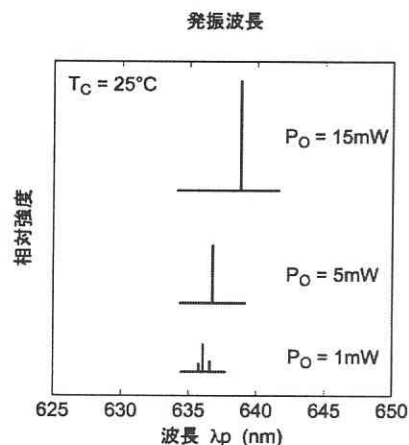


図4 レーザダイオード出力と波長

ディテクターに検出される光は、直線Aの干渉となりビート信号を発生しない。しかし、サンプルミラーが光路差  $\Delta l$  をもって置かれた場合、サンプルミラーからの反射光は、そのときの時間遅れを  $\Delta \tau$  とすれば

$$\Delta \tau = \frac{2\Delta l}{c}, \quad (1)$$

の時間遅れを伴い、直線Bの信号として、フォトディテクターに入射する。ここで  $c$  は光速。フォトディテクターでは  $f_b$  だけ周波数の異なる信号光Aと信号光Bが干渉し、ビート信号  $f_b$  を発生させる。このときのビート信号  $f_b$  は

$$f_b = \kappa \Delta \tau, \quad (2)$$

で与えられる。このとき、比例定数  $\kappa$  は、レーザ光の波長変化量/時間とする。式(2)より、フォトディテクターに検出されるビート信号が光路差に比例することから、ビート信号の周波数を求めることにより参照ミラーと相

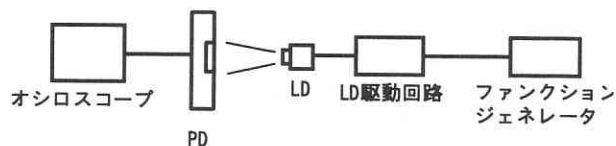


図5 レーザダイオード光源の評価システム

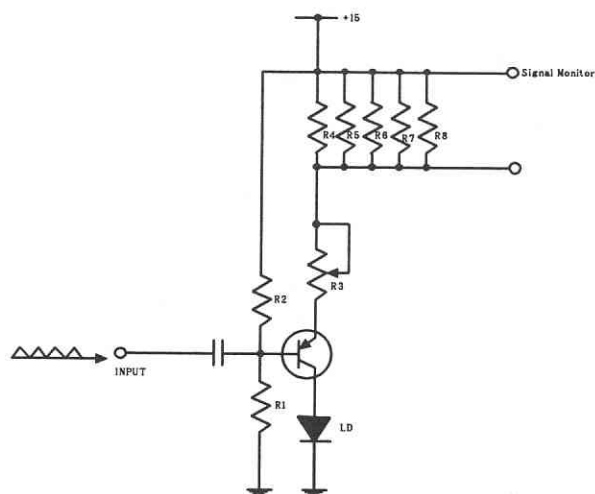


図6 レーザダイオードの駆動回路

対位置を計測することが可能となる。

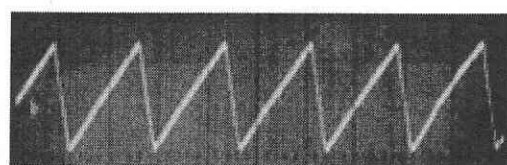
## 2.2 レーザダイオードの波長走査

一般的なレーザダイオードの場合、レーザダイオードを流れる電流が変化すると、発光強度が変化するとともに、発振波長も変化する。図3に注入電流に対するレーザ出力のグラフを示す。閾値を超えると注入電流に対して線形的にレーザ出力が変化する。また、図4にレーザ出力に対する発振波長の関係を示す。レーザ出力が増加するにつれて、波長が長波長側にシフトするのがわかる。このようなレーザダイオードの発振特性を利用し、光源の波長走査を行う。

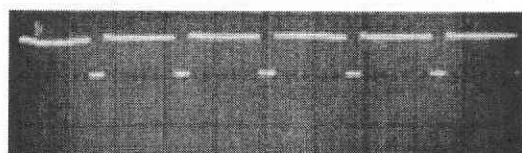
## 3. 実 験

### 3.1 レーザダイオードの発振特性

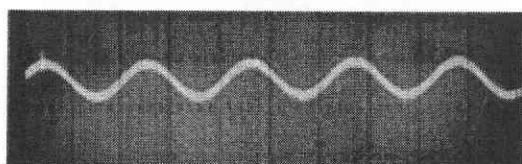
図5に示す光学システムによりレーザダイオード光源の評価を行った。用いたレーザダイオードはカソードコモン型日立製 HL6321 である。図6にそのレーザダイオードの駆動回路を示す。この回路では入力端子に加えられた交流成分のみが通過できる。また、抵抗 R3 により駆動電流の調整を行い、Signal Monitor 端子により実際の駆動電流波形の検出を行う。ファンクションジェネレータにより周期 100Hz の矩形波、正弦波、ノコギリ波などの信号をレーザダイオード駆動回路に入力し、レーザからの光強度をフォトディテクターにより受光し、オシロスコープによりその光高度の変化を観察した。それぞれの入力波形に対する発光強度の信号を図7に示す。図に示すように波形の歪みは小さい。また、図8にノコギリ波に対する出力強度を時間軸方向に拡大したものを示す。図よ



(a)



(b)



(c)

図7 レーザダイオードの強度出力  
(信号周波数 100Hz)

入力波：(a)ノコギリ波、(b)矩形波、(c)正弦波

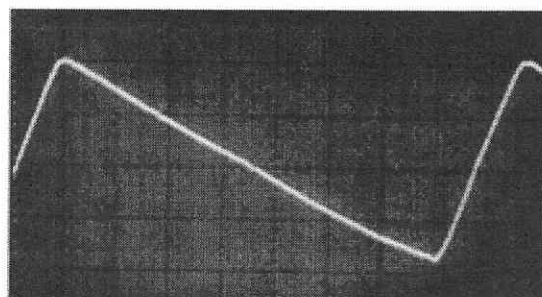


図8 レーザダイオードの出力強度の線形性

り光強度の線形性は保たれていると考えられる。また、この実験により、レーザダイオードの発振は熱の影響をかなり受け、パッケージの冷却を行わなければ、レーザの出力を保てないことが明らかとなった。

### 3.2 波長変調の評価と相対位置検出

レーザ強度がレーザダイオード駆動回路の入力信号に対応して変化することが確認できたため、次に注入電流変化による波長走査を評価した。実験の光学系は図1のマイケルソン光学系を用いた。フォトディテクターの出力信号が小さいため、一度ロックインアンプにより増幅し、その信号をオシロスコープに入力した。図9に光路差が無い場合を、図10に光路差が 10mm ある場合の干渉信号を示す。レーザダイオード駆動信号には 100Hz の三角波を用いた。光路差が無い場合、ビート信号は検出されていない。10mm の光路差がある場合、ビート信号が検出された。また、図10(b)は同図(a)の条件下でレーザダイオードの駆動電流を下げた場合であるが、ビート周波数が低下していることから注入電流に対して波長の走査幅が小

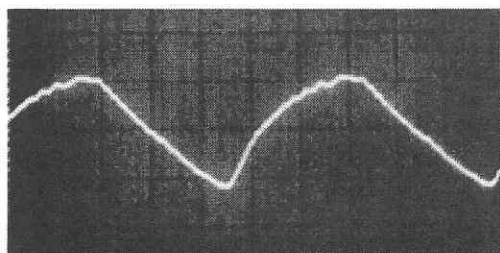
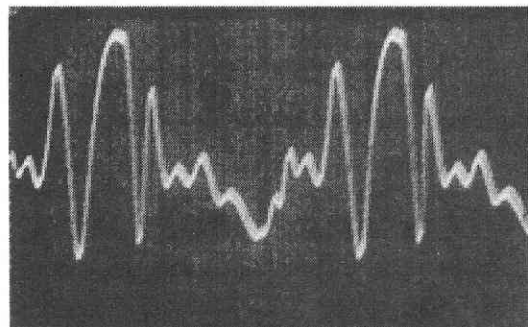
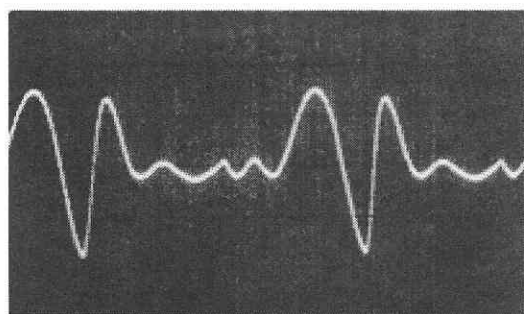


図9 光路差がない場合の干渉信号



(a)



(b)

図10 光路差によるビート信号

(a)光路差 10mm

(b)光路差 10mm 駆動電流を下げた場合

さくなっていることが確認できた。

本光学系では、ビート信号の周波数に対応して位置の情報が計測されるため、位置計測の分解能を向上させるためには、ビート信号の周波数分解能を向上させなければならない。しかし、そのためにはナイキストのサンプリング定理より計測時間を長くする必要がある。実際に

は、レーザダイオードの注入電流には上限があるため、最大の計測時間間隔は注入電流の許容電流値に達するまでの時間となる。一方、波長変化の大きなレーザダイオードを用いることにより、ビート信号の周波数変化量を増加させ、周波数分解能を向上させる方法も考えられる。

## 4. 結 言

小型で、機械的な駆動機構を必要としないOCTシステムの実現のため、レーザダイオードの波長走査により相対位置を検出する計測システムを試作した。レーザダイオードの注入電流を走査させることにより、参照ミラーとの位置の差によるビート信号を確認した。これにより、波長走査による位置計測が可能であることがわかった。

## 文 献

- 1) 倉本丈久ほか3名：広島県立東部工業技術センター研究報告, 15, 1-4 (2002).
- 2) 竹保義博ほか3名：広島県立東部工業技術センター研究報告, 15, 5-8 (2002).
- 3) 門藤至宏ほか4名：広島県立東部工業技術センター研究報告, 15, 9-12 (2002).
- 4) 廣川勝久ほか3名：広島県立東部工業技術センター研究報告, 15, 13-16 (2002).
- 5) 門藤至宏ほか4名：広島県立東部工業技術センター研究報告, 16, 13-16 (2003).
- 6) 廣川勝久ほか3名：広島県立東部工業技術センター研究報告, 16, 17-20 (2003).
- 7) I. Hartl, X.D.Li, C. Chudoba, R. K. Ghanta, T. H. Ko, and J.G. Fujimoto J. K. Ranka and R. S. Windele : Opt. Lett., 26, 9, 608-610 (2001).
- 8) C. Yang, A. Wax, M. S. Hahn, K. Badizadegan, R. R. Dasari, and M. S. Feld : Opt. Lett., 26, 127 (2001).
- 9) Xingde Li, Tony H. Ko, and James G. Fujimoto : Opt. Lett. 26, 1906 (2001).
- 10) Zhao, Z. Chen, Z. Ding, H. Ren, and J. S. Nelson : Opt. Lett. 27, 8(2002).
- 11) Jinpin Ying, Feng Liu, P. P. Ho, and R. R. Alfano : Opt. Lett., 25, 16, 1189-1191 (2000).
- 12) J. H. Ali, W. B. Wang, P. P. Ho, and R. R. Aifano : Opt. Lett., 25, 1303 (2000).
- 13) 廣川勝久ほか3名：広島県立東部工業技術センター研究報告, 13, 12-15 (2000).