簡易型パルスステージとピエゾステージの協調制御による 高精度レーザ描画システム

正 員 後藤 信夫* 正 員 宮崎 保光**

High Precision Laser Drawing System Using Cooperation Control of Low-Precision Pulse-Stages and Piezo-Stage

Nobuo Goto*, Member, Yasumitsu Miyazaki**, Member

Precise patterning of optical waveguides is required in fabrication of integrated-optic circuits. In this paper, stage control for laser drawing system with 10nm precision is investigated. The precise control is performed by analog and digital feedback with pulse stages and piezo stages. Mechanical fluctuation and vibration due to pulse drive by stepping motors are compensated by piezo stage. Further, cooperation of pulse and piezo stages is demonstrated to make smooth translation of stage possible.

キーワード：レーザ描画，パターニング，フィードバック制御，パルスステージ，ピエゾステージ

Keywords : Laser drawing, Patterning, Feedback control, Pulse stage, Piezo stage

1. はじめに

光集積回路を試作する際、チャンネル型光導波路や微細電極等の高精度なパターニングが要求される。パターン描画装置におけるステージ制御は、位置決め精度のみでなく、移動途中の描画軌跡に揺らぎや振動がないことが要求される。

光集積素子試作におけるパターニングの装置としては、レーザ描画装置が簡便であり、高精度化の検討がなされている^{(1)~(3)}。本論文では、簡易パルスステージにレーザ干渉計による変位計測とフィードバック制御による簡易型レーザ描画装置の検討を行う。ステージ制御の精度を高めるため、ピエゾステージとパルスステージを組み合わせた協調制御により、10nm 程度以下の精度でパターニングを実現することをめざす⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

2. レーザ描画システムの構成

〈2・1〉 描画システムとステージ構成 レーザ描画システムの基本構成を図 1(a)に示す。描画は、波長 465.8nm の Ar イオンレーザ光を用い、ガラス板に塗布したフォトレ

(a) Configuration of laser drawing system

(b) Piezo stage

図 1 レーザ描画システム

Fig. 1. Laser drawing system.

* 豊橋技術科学大学
〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1
Toyohashi University of Technology
1-1, Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi 441-8580
** 愛知工科大学
〒443-0047 蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Aichi University of Technology
50-2, Manori, Nishihazama-cho, Gamagori 443-0047

Table 1. Mechanical specifications of pulse stage.

表2 ピエゾステージの特性

Table 2. Specifications of piezo stage.

図2 ステージ上の座標系と変位

Fig. 2. Coordinate system and displacements.

図3 ステージ制御ブロック図

Fig. 3. Block diagram of stage control.

で定義すると,

$$d(k) = K_p \{y(k-1)\} + K_i \{r_2(k) - y(k)\} + K_d \{2y(k-1) - y(k-2) - y(k)\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

となる。ここで、 $r_2(k-2)=r_2(k-1)=r_2(k)$ とした。また、 $K_p=k_c - K_i/2$, $K_i=k_c \tau / T_i$, $K_d=k_c T_d/\tau$ とおいた。(5)式を z 変換して,

$$D(z) = K_p (z^{-1} - 1)Y(z) + K_i (R_2(z) - Y(z)) + K_d (2z^{-1} - z^{-2} - 1)Y(z) \quad \dots\dots\dots(6)$$

図 3 において、 $G_{st1}(z)$, $G_{st2}(z)$ はパルスステージ 1,2 のパルス伝達関数を表す。このパルスステージのデジタル制御において(付 1), (付 2)式で表される y 方向の変位の測定信号より伝達関数 $H_{LPF}(s)$ の LPF で振動成分を除いた変位データから(付 3), (付 4)式の信号成分を求め、(付 1)~(付 4)式の信号から得られる間隔 $d_m = \lambda / 16$ の離散値が $y(k)$ となる。この $y(k)$ を制御用コンピュータに取り込む。 $r(k)$ はパルスステージ 1 ステップ移動量 $d_d \doteq 20\text{nm}$ の間隔の離散値となる。このデジタル制御の分解能は d_m, d_d で制限されるため、アナログフィードバックと組み合わせることにより高精度化を達成する。 y 方向変位測定信号より伝達関数 $H_{HPF}(s)$ の HPF を通して振動成分のみを取り出し、伝達関数 $H_{AC}(s)$ を有するアナログフィードバックを行い伝達関数 $G_{pi}(s)$ のピエゾステージを駆動する。また、位置決め分解能を高めるため、コンピュータの出力を D/A 変換し、ピエゾステージを駆動する。

図 4 パルスステージとピエゾステージの連動制御
Fig. 4. Cooperative control of pulse and piezo stages.

パルスステージとピエゾステージの連動制御による高精度化の概念図を図 4 に示す。図 4(a)は x, y 軸に対し斜めの直線を描画する場合を示している。パルスステージの 1 ステップ分の移動量 d_d までピエゾステージで移動し、その移動量に達した時点でパルスステージで 1 ステップ移動すると同時にピエゾステージを元に戻す。図 4(b)は x 方向に直線を描画する際の連動制御を示している。この場合、 $H_{HPF}(s)$ の HPF を通さないで、緩やかな揺らぎ成分もアナログフィードバック信号とし、ピエゾステージでパルスステージの揺らぎを補正するが、補正量が d_d に達したとき、 y 方向パルスステージを 1 ステップ移動し、ピエゾステージを元に戻す。すなわち、ピエゾステージは次の 2 つの役割をする。

- (1) 変位センサーからの信号の移動成分のみ HPF で取り出し、アナログ信号のまま PID フィードバック制御し、パルスステージ 1,2 の y 方向の移動補償を行なう。
- (2) パルスステージとの連動制御により、高分解能な移動量制御を行なう。

3. ステージ開ループ駆動特性

〈3・1〉 パルスステージ はじめに、ステージ 1 のみを駆動したときの y 方向の揺らぎ $\Delta_1 y$ を測定した。 $\Delta_1 y$ を x 方向 1 ステップ移動毎に計測しているが、 x 方向に 20mm 駆動したときの $40 \mu\text{m}$ 毎の $\Delta_1 y$ の測定値を図 5(a)に示す。 x 方向に 20mm 駆動後 $-x$ 方向に 20mm 駆動し、原点に戻し、繰り返し 3 回計測した結果を重ねてプロットしている。図 5(b)は測定結果のパワースペクトルを計算した結果で、3 回の測定値から求めたスペクトルを平均している。ステージ駆動部ねじのピッチが 1mm であり、そのピッチに対応した

図 5 ステージ 1 を駆動したときの y 方向変動
Fig. 5. Y-deviation when stage 1 is driven.

揺らぎが見られる。

次に、パルス駆動に起因する振動を調べる。図 6(a)はステージ 2 を 1 ステップずつ駆動したときの y 方向変位 Δy を示す。ここで、PD の出力 $I_1(t)$ または $I_2(t)$ から(付 6)式または(付 7)式により $\Delta y(t)$ を計算している。駆動パルス幅は約 7.8ms である。パルスを印加した時刻を t_i ($i=1,2,3,\dots$) とし、その t_i 直前の変位を $(\Delta y)_i$ とし、それらの値からの変化を $i=1 \sim 3$ について重ねて示している。振動振幅は約 40nm(p-p) である。パルスステージの 1 ステップ当りの移動量は、理想的には 20nm となるはずであるが、図 6 の結果では 15nm 前後の値になっている。連続的に移動させると平均 20nm に近づく。図 6 において移動量が小さい原因は静止摩擦に

(a) 1-step drive

(b) 3-step drive

(c) Y-vibration for 3 step drive

図 6 1 ステップおよび 3 ステップ駆動における振動

Fig. 6. Y-vibration for 1-/3-step drives.

よる影響等が考えられる。実際のパターン描画においては 4 章で述べるようにピエゾステージとの連動フィードバック制御により目標パターンの描画を可能としている。

ステッピングモータのパルス駆動による振動を抑える無振動整定の手法として逆相励磁ダンピング法 (3 ステップ駆動)、最終ステップ遅延ダンピング法、マイクロステッピング駆動法などがある⁽⁷⁾。この中で 3 ステップ駆動法はモータを右回り (CW) に 1 ステップ駆動したい場合、はじめの CW パルスの T_1 時間後に左回り (CCW) パルスを加え、さらに T_2 後に再度 CW パルスを加え、安定点に無振動に整定するのである。図 6(b)は 3 ステップ駆動による駆動例を示す。ここで、 $T_1=T_2=2.0\text{ms}$ とした。この結果においても移動量は 20nm に比べ小さくなっている。図 6(c)は T_1, T_2 を変化させたときの振動の振幅を示す。 T_1, T_2 が 2.0~2.5ms 付近で最適となっている。

図 7(a)は 1 ステップと 3 ステップ駆動におけるパルス間隔 (3 ステップの場合は第 1 パルスと次の第 1 パルスの間隔) に対する振動の振幅を示す。1 ステップ駆動では、パルス周期 4ms 程度の速い速度で駆動すると振動は 5nm 以下と低く抑えられるが、共振付近では大きな振動を伴う。3 ステップの測定値は $T_1=2.0\text{ms}, T_2=2.5\text{ms}$ の場合であるが、パルス周期 70ms 程度以上では 1 ステップ駆動に比べ振動は約半分になっている。

図 7(b)はステージ 1 を 1 ステップ駆動したときの y 方向の振動 $\Delta_1 y$ の測定値を示す。ステージ 1 は通常の描画においては速い速度で連続駆動するが、その場合でも 13nm 程

(a) When stage 2 is driven

(b) When stage 1 is driven

図 7 ステージ 1,2 の駆動に伴う Y 方向振動

Fig. 7. Y-vibration when stage 1 or 2 is driven.

の振動が生じていることがわかる。図 8 はステージ 2 を連続的に駆動したときの y 方向の変位量 Δy のスペクトル $|\Delta Y(\omega)| = |F[\Delta y(t)]|$ を示す。約 20Hz にピークがある。すなわち 20Hz 以下の成分はパルス駆動に伴う振動成分であり雑音成分ではない。

〈3・2〉 ピエゾステージ ピエゾステージは 4 枚のピエゾ板を重ね合わせた構成である。1 枚の素子で変位量は 100V あたり 6.1nm であった。4 枚重ねたピエゾステージでは可動部変位量は 10V あたり約 3.9nm になる。図 9 に印加

図 8 ステージ 2 の連続駆動に伴う振動スペクトル
Fig. 8. Vibration spectrum when stage 2 is continuously driven.

図 9 ピエゾステージ印加電圧に対する変位特性
Fig. 9. Displacement of piezo stage vs. voltage.

図 10 ピエゾステージの伝達特性
Fig. 10. Transmission characteristics of piezo stage.

電圧 V_{pi} に対する y 方向の変位 Δy を示す。わずかなヒステリシスが見られる。

ピエゾ素子自身の厚み振動の共振周波数は 2.5MHz であるが、質量 65g の可動部を含めた伝達特性 $G_{pi}(s) = G_{pi}(j\omega)$ は図 10 のようになり、約 700Hz に共振ピークがあるが、600Hz 付近まで応答することがわかる。 $G_{pi}(s)$ は、ばね定数を k 、減衰係数を ζ 、可動部の質量を M としたモデルで近似すると、 $G_{pi}(s)$ は

$$G_{pi}(s) = \frac{A_{pi} N_{pi} e_{33} / t_{pi}}{Ms^2 + \zeta s + k} \quad (7)$$

と表される。ここで、 A_{pi} はピエゾ素子と移動部の接触面積で $A_{pi} = 1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 、 N_{pi} はピエゾ素子の枚数で $N_{pi} = 4$ 、 t_{pi} はピエゾ素子 1 枚の厚みで $t_{pi} = 1 \text{ mm}$ 、 e_{33} はピエゾ素子の圧電定数である。実験結果と比較して、 $k \approx 1.3 \times 10^6 \text{ N/m}$ 、 $\zeta \approx 100 \text{ Ns/m}$ と推定される。

4. フィードバック制御

〈4・1〉 パルスステージ制御 はじめに、パルスステージのみに対してデジタルフィードバック制御を行った。図 11(a) は $+x$ 方向に 2mm、 $+y$ 方向に 1 μm 、 $-x$ 方向に 2mm を描画させる設定（破線）にて、フィードバック制御なしで駆動したときの x 方向の描画軌跡距離に対する y 方向

(a) Without feedback

(b) With feedback

図 11 PID フィードバック制御による変位量改善
Fig. 11. Improvement of deviation by PID feedback.

の変位を示す。±1.5μm 程度の揺らぎが見られる。測定値は x 方向移動距離 4μm 毎にプロットしている。図 11(b)はフィードバック制御を行った場合で、±40nm 以内に制御されていることが分かる。

次に、x 軸に対して 1/100 の勾配、すなわち+x 方向に 100μm と同時に-y 方向に 1μm 直線移動、続いて-x 方向に -100μm と同時に+y 方向に 1μm 直線移動し、原点に戻る描画パターンを考える。結果を図 12 に示す。測定値は

図 12 斜め描画したときの y 方向変位
Fig. 12. Y-deviation for oblique drawing.

図 13 振動成分抽出のための HPF 伝達特性
Fig. 13. Transmission characteristics of HPF for vibration component selection.

図 14 振動抑制のアナログフィードバック伝達特性
Fig. 14. Transmission characteristics of analog feedback for vibration suppression.

100nm 毎にプロットしている。目標値に対してほぼ±40nm 以内に制御されている。

〈4・2〉 ピエゾステージ制御 〈3・1〉 節の測定結果より、パルスステージ駆動に伴う振動成分のうち 20Hz 以下の成分は雑音成分ではないため、振動制御の信号処理回路における HPF はカットオフを 20～60Hz の間に設計する必要がある。図 13 にカットオフ $\omega_c/2\pi=50\text{Hz}$ のベッセル HPF フィルタの伝達特性 H_{HPF} を示す。 H_{HPF} は

$$H_{\text{HPF}}(s)=\frac{s^2}{s^2+(\omega_0/Q)s+\omega_0^2}\cdots\cdots(8)$$

である。ここで $\omega_0=0.79\omega_c$, $Q=0.58$ とした。

図 14 は振動抑制のためのアナログフィードバックにおける伝達関数 $H_{\text{AC}}(s)$ のゲインおよび位相特性を示す。ここで、

$$H_{\text{AC}}(s)=-K\frac{T_{\text{AC}}s+1}{\beta T_{\text{AC}}s+1}\cdots\cdots(9)$$

と設計した。ただし、 $K=100$, $\beta=6$, $T_{\text{AC}}=1.6\times10^{-4}\text{ s}$ とした。図 10 に示すように、700Hz 付近に共振ピークがあるため、

(a) Without piezo feedback

(b) With piezo feedback

(c) Power spectrum of vibration

図 15 振動補償による振動成分抑圧 (y 方向 1 ステップ駆動時)

Fig. 15. Suppression of vibration by piezo feedback (in case of 1-step drive in y-direction).

帯域を図 14 に示すように、このピークより十分狭く設計した。

次に、パルスステージ駆動に伴う振動の抑圧実験結果を示す。図 15 は y 方向に 1 ステップずつ駆動したときの変位センサ出力を示す。ピエゾ素子を駆動しない場合 **peak-to-peak** で約 30nm の振動がピエゾ素子により 10nm 程度に抑えられている。振動の周波数スペクトル $\Delta Y(\omega)$ も同図に示す。約 60Hz の振動成分がピエゾステージにより振動補償しない場合、**peak-to-peak** で 30nm 程度であるが、ピエゾステージにより振動補償することにより 10nm 程度に抑えられている。

図 16 は、 x 方向に連続的にステージを駆動したときの振動抑制の様子である。約 60Hz の振動は **peak-to-peak** で約 40nm から約 20nm に抑圧されている。振動の周波数スペクトル $\Delta Y(\omega)$ において、60Hz 付近の成分は 1/3 以下に抑えられている。155Hz 付近の振動はフィードバック制御のゲインが下がっているため半分程にしか抑圧されていないが、振幅も元々小さく 60Hz 付近の振動と同程度まで抑えられている。また、30Hz 付近に振動成分があるが、これは振

(a) Without feedback

(b) With feedback

(c) Power spectrum of vibration

図 16 振動補償による振動成分抑圧 (x 方向連続駆動時)

Fig. 16. Suppression of vibration by piezo feedback (in case of continuous drive in x -direction).

動成分を抽出する HPF のカットオフに近く十分抑えられていない。 y 方向に連続駆動したときの変位計測信号成分が約 20Hz であり、この成分を抑えると y 方向に連続移動する速さを遅くする必要が生じる。

〈4・3〉 連動制御 次に、ピエゾステージとパルスステージの連動制御による高分解能化の検討を行った。パルスステージの 1 ステップは約 20nm であり、図 6 に示ような連動制御による滑らかな斜線描画を考える。

図 17 に示すように、D/A 変換回路を介して、のこぎり波状にピエゾステージに電圧を印加し、さらに、印加電圧が最大に達した時点でピエゾステージを元に戻すと同時にパルスステージにより y 方向に 1 ステップ移動させ、連続的に移動させたものである。ピエゾステージの電圧は時間 t_d だ

(a) Cooperation of pulse and piezo stages

(b) Deviation peak for delay time t_d

(c) Deviation for cooperation control

図 17 ピエゾステージとパルスステージの連動制御

Fig. 17. Cooperation control by piezo and pulse stages.

けかけて徐々に低下させる。この t_d を最適に調節することにより移動量の目標からのずれ（図の y_f および y_b ）を抑圧することができる。図(b)はに t_d 対する y_f および y_b を測定した結果である。 $t_d \approx 20\text{ms}$ 付近において最適な制御が行える。図(c)は $t_d = 17\text{ms}$ における実験結果である。ピエゾステージへの印加電圧には抑圧制御のフィードバック信号も重畳されている。パルスステージの1ステップは約20nmであるが、20nmからのずれのため5nm程度の不連続は生じる可能性がある。

5. まとめ

光集積回路や微細電極等を試作する際に必要となる高精度なレーザ描画装置を簡易型ステージを用いて構成するためのステージ制御の検討を行った。ステッピングモータ駆動のパルスステージとピエゾ素子駆動のピエゾステージを組み合わせた連動制御により高分解能で振動の少ないステージ制御が可能となることを示した。

今後、協調制御に関してさらなる改善を行う必要がある。
(平成15年11月11日受付, 平成16年4月19日再受付)

文 献

- (1) K. E. Wilson, C. T. Mueller, and E. M. Garmire: "Laser writing of masks for integrated optical circuits", IEEE Trans. On Components, Hybrids, and Manufacturing Tech., Vol. CHMT-5, No.2, pp.202-214 (1982)
- (2) M. Haruna, Y. Murata, and H. Nishihara: "Laser beam direct writing of TiO_2 channels for fabrication of Ti:LiNbO_3 waveguides", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.31, Part 1, No.5B, pp.1593-1596 (1992)
- (3) H. Onda, A. Asahara, and S. Fujii: "Development of laser beam writer", *J. of Japan Society for Precision Eng.*, Vol.58, No.11, pp.1837-1842 (1992) (in Japanese)
恩田・浅原・藤井:「レーザビーム描画装置の開発と応用」, 精密工学会誌, Vol.58, No.11, pp.1837-1842 (1992)
- (4) N. Goto and Y. Miyazaki: "Precise control method in laser drawing system for patterning of integrated-optic switching circuits", Tech. Group of IEICE Japan, OCS95-80, pp.21-28 (1995) (in Japanese)
後藤信夫・宮崎保光:「光交換集積回路のレーザ描画による超微細作成における制御法」, 電子情報通信学会技術報告, OCS95-80, pp.21-28 (1995)
- (5) N. Goto and Y. Miyazaki: "Automatic laser drawing system for optical waveguide circuits with nanometer precision using aser", ech. Group of IEICE Japan, MW98-26, pp.13-19 (1998) (in Japanese)
後藤信夫・宮崎保光:「レーザを用いたナノメートル精度の光導波路回路用自動パターン描画システム」, 電子情報通信学会技術報告, MW98-26, pp.13-19 (1998)
- (6) Y. Takahashi: "Simple discrete control of industrial processor", *Trans. ASME, J-DSMC*, Vol.97, Ser.G.4, p.354 (1975)
- (7) T. Kenjo: *Stepping motors and their microprocessor controls* (Oxford Univ. Press, 1984)

付 録

レーザ光による変位および振動検出

y 軸方向移動量を高精度に測定するために、波長 $\lambda = 633\text{nm}$ の He-Ne レーザ光による干渉計を用いる。基準ミラーはピ

エゾステージ上に固定し、参照ミラーを含む干渉計は付図1に示す小型センサヘッドにより構成している。約2.5mmの径に広げたレーザビームをマイケルソン干渉計に入射させ、位相差が $\pi/2$ である2信号を得られるよう厚さ $t_g = 3\text{mm}$ の BK7 平行平板ガラスの表裏からの反射光を利用する。

ガラスからの S 偏光の反射光(入射角: $\pi/4$)の反射率を r とし、(BK7 では $r = 0.096$)、 $R_1 = r(1-r)^2$ 、 $R_2 = r(1-r)^4$ とすると、一方の干渉計の光路長差を $\Delta l = 2(l_1 - l_2)$ として、2つのフォトダイオード(PD)からの出力は

$$I_1 = I_0(R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \sin \phi) \dots\dots\dots (\text{付} \cdot 1)$$

$$I_2 = I_0\{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \sin(\phi + \pi/2)\} \dots\dots (\text{付} \cdot 2)$$

となる。ここで、 I_0 は入射光強度に対する出力、 $\phi = 2\pi\Delta l/\lambda$ である。 I_1, I_2 から信号処理回路により

$$I_3 = I_1 + I_2 = 2I_0\{R_1 + R_2 + \sqrt{2R_1 R_2} \sin(\phi + \pi/4)\} \dots\dots\dots (\text{付} \cdot 3)$$

$$I_4 = I_2 - I_1 = 2I_0\sqrt{2R_1 R_2} \sin(\phi + 3\pi/4) \dots\dots\dots (\text{付} \cdot 4)$$

が得られ、 $I_1 \sim I_4$ の偏角が $n\pi$ ($n=0, 1, 2, \dots$) となる回数をカウントすることにより分解能 $\lambda/16$ ($\approx 40\text{ nm}$) で Δl の変化を測定できる。さらに $\lambda/32$ の分解能を得るためには、 $I_1 + I_3/\sqrt{2}$ 、 $-I_1 + I_3/\sqrt{2}$ 、 $I_2 + I_3/\sqrt{2}$ 、 $I_2 - I_3/\sqrt{2}$ の信号を用いればよいが、本研究では $\lambda/16$ とした。

温度変動が計測に与える影響を評価する。干渉計の2光路に対する位相差 $\Delta\phi$ の温度依存性 $d(\Delta\phi)/dT$ は

付図1 レーザ干渉センサヘッド構成図
app. Fig. 1. Structure of laser interference sensor head.

付図2 振動成分抽出のための信号処理ブロック図
app. Fig. 2. Block diagram of signal processing for selection of vibration component.

$$\frac{d(\Delta\phi)}{dT} = \frac{4\sqrt{2}\pi t_g}{\lambda} \left(\frac{dn}{dT} + (n-1)\alpha \right) \quad \text{..... (付・5)}$$

となる。ここで、 dn/dT はガラスの屈折率 n の温度依存性、 α は線膨張係数である。BK7では $dn/dT \doteq 2.7 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ 、 $\alpha \doteq 7.2 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ であり $d(\Delta\phi)/dT \doteq 0.53 \text{ 1/K}$ となる。温度依存性は参照ミラー側にも同じガラスを挿入することにより改善できる。

次に、2つのPDの出力 I_1, I_2 から振動成分を抽出する方法を考える。 I_1, I_2 からDC成分を除いた信号を I_1', I_2' とし、 y 方向変位を $\Delta y(t)$ 、 $A=2I_0(R_1R_2)^{1/2}$ 、 $k_0=2\pi/\lambda$ とすると

$$I_1'(t) = A \sin(2k_0\Delta y(t) + k_0\Delta l) \quad \text{..... (付・6)}$$

$$I_2'(t) = A \cos(2k_0\Delta y(t) + k_0\Delta l) \quad \text{..... (付・7)}$$

となる。いま、振動成分を $n_v(t)$ 、 $n_v(t)$ に比べ十分緩やかな変化を $y_0(t)$ とし、 $\Delta y(t) = y_0(t) + n_v(t)$ とすると、 $|n_v(t)| \ll \lambda$ のとき

$$I_1'(t) \doteq A \{ \sin(2k_0\Delta y_0 + k_0\Delta l) + \cos(2k_0\Delta y_0 + k_0\Delta l) 2k_0 n_v(t) \} \quad \text{..... (付・8)}$$

$$I_2'(t) \doteq A \{ \cos(2k_0\Delta y_0 + k_0\Delta l) - \sin(2k_0\Delta y_0 + k_0\Delta l) 2k_0 n_v(t) \} \quad \text{..... (付・9)}$$

で近似できる。付図2のブロック図で示す信号処理回路により、振動成分を取り出すと、出力 $O_n(t)$ は

$$O_n(t) = -(I_1')_{HPF} \text{sgn}(I_2') + (I_2')_{HPF} \text{sgn}(I_1') \quad \text{..... (付・10)}$$

と表される。 $(I_i')_{HPF}$ および $\text{sgn}(I_i')$ は、 I_i' から高域通過フィルタHPFにより振動成分のみを取り出した信号および I_i' の符号を示している。この $O_n(t)$ は次式となる。

$$O_n(t) = -A \{ |\sin(2k_0\Delta y_0 + k_0\Delta l)| + |\cos(2k_0\Delta y_0 + k_0\Delta l)| \} 2k_0 n_v(t) \quad \text{..... (付・11)}$$

従って、 $2k_0 y_0 + k_0 \Delta l$ の値によらず振幅は同符号となり振動成分が抽出できる。

後 藤 信 夫

(正員) 1956年生。1979年3月名古屋大学工学部電気工学科卒業。1984年名古屋大学工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了。工学博士。1984年同大工学部電気工学科助手。1986年豊橋技術科学大学情報工学系助手、1989年同大情報工学系講師、1993年同大情報工学系助教授、現在に至る。この間、1987～1988年カナダ・マックギル大学客員研究員、2001～

2002年国際協力事業団長期専門家としてマレーシア・マルチメディアネットワーク教育プロジェクトに派遣。主として、音響光学効果を用いた光集積回路、フォトニックルーティングの研究に従事。1984年電子通信学会学術奨励賞受賞。電子情報通信学会、IEEE会員。

宮 崎 保 光

(正員) 1941年生。1963年3月名古屋大学工学部電子工学科卒業。1968年名古屋大学工学研究科電子工学専攻博士後期課程修了。工学博士。1972年同大工学部電気工学科講師、1976年同大工学部電気工学科助教授。1981年豊橋技術科学大学情報工学系教授。2003年愛知工科大学電子情報工学科教授。この間、1973～1975年西ドイツ・ブラウンシュバイク工科大学高周波研究所に客員として出張、1996年ベルリン工科大学の客員教授。1999年豊橋技術科学大学マルチメディアセンター長。主として、ミリ波導波路、光ファイバ、光集積回路、電磁波の散乱・回折、EMC、生体電磁工学の研究に従事。1970年米沢賞受賞。著書：「応用ベクトル解析」。電子情報通信学会フェロー、応用物理学会、IEEE会員。