高分解能化された自動化副尺法による 光学的変位計測系[†]

盧 度 煥*・山 浦 富 雄*・小 林 彬*

High Resolution Optical Displacement Measuring System by Improved Automated Vernier Scale Method

Dohwan RHO*, Tomio YAMAURA* and Akira KOBAYASHI*

The scales of the Vernier calipers widely used in precise length measurement are a combination of a main scale and a Vernier scale, which are two kinds of scales with wide different pitch scale lines. The scale combination makes it possible to measure the length in higher resolution than the original scale line pitch.

In this paper, the above concept of the Vernier calipers is introduced to a new displacement measuring system for high resolution and high accuracy. In this system, the main and Vernier scales are replaced with light sources and photo-sensors to make automatic scale reading (this is called automated Vernier scale method). The measured displacement is given in the discrete interval, so the measuring resolution is limited with respect to the width of the discrete interval. To improve this resolution limit, we propose two algorithms utilizing analog data processing without any change of the hardware construction. They are the first order moment algorithm and the phase discrimination algorithm.

To examine the improved automated Vernier scale method, we construct an experimental measuring system. The main scales are replaced with photo-sensor array of twenty sensors at intervals of 0.5 mm. The Vernier scales are replaced with light beams of a laser diode scanned by a polygon mirror. As the experimental results, the repeatable accuracy of the measurement was $\pm 3 \sim 4 \mu\text{m}$ within 5

mm of measuring range.

Key Words: displacement measurement, automated Vernier scale method, analog data processing, high resolution, photo-sensor array

1. ま え が き

生産システムにおいて、物体の位置変化に伴う変位を測定し、位置を制御したいという要求は最も基本的な要求である。FMS など生産工程の自動化に伴い、変位計測においても非接触、かつ高速の測定が要求されている。また、精密計測に対する精度の要望もますます高くなってきており、測定範囲も広く要望されつつある。それに伴い、多くの研究も行われている。

非接触変位計測の方式としては、光学式、磁気式、静電容量式、超音波式、マイクロ波式など各種の原理のものが開発され、取り扱う対象や目的に応じて使い分けられている。

光学的変位測定方式のうち、発光・受光素子を適当に配置し変位をデジタル的に検出する方式においては、検出系のピッチが分解能の限界を与える。

著者らは、長さの精密測定に広く用いられているノギスの構造に着目し、主尺および副尺の目盛線をそれぞれ発光・受光素子列で置換した光学的計測系を構成して目盛の読取を自動化することを提案し¹⁾、目盛線のピッチ以上の分解能で測定が可能な高分解能・高精度の新しい変位計測法を検討してきた。

本論文では、実際に受光素子を、太陽電池をアレイ化したリニアセンサで構成して主尺として用い、また副尺側は発光素子として1個の半導体レーザーを用い、その光束を回転多面鏡で走査しつつ、かつ時分割で利用する能動的マルチ・センシング系をなす変位計

[†] 第29回自動制御連合講演会で発表(昭61・11)

* 東京工業大学工学部 東京都目黒区大岡山 2-12-1

* Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo

(Received November 12, 1986)

(Revised February 23, 1987)

測系を試作した。また、実験的にその特性を検討し、有効性を確かめた。

2. 測定原理

測定系の構成と原理についてはすでに報告した通りであるが¹⁾、以下にその概略を述べる。副尺の考え方を導入した光学の変位計測系では、主尺および副尺の目盛線をそれぞれ発光素子列と受光素子列に置き代えるわけであるが、まず、発光・受光系のピッチ関係についてつぎのような条件が満たされている。

$$(n-1)P = (n-2)Q \quad (1)$$

ここで、 n 、 P および Q は、おのこの発光素子の個数、発光系のピッチ、および受光系のピッチを表わす。なお、受光素子の個数 m は、 $m \geq n-1$ のようにとればよいが、 n と m の値が決まると測定レンジが定まり、その大きさは $\{m-(n-1)\}Q$ で与えられる。

また以下では、発光素子の光束分布および受光素子の指向性がそれぞれ軸対称で、かつ光軸でピーク値を取る単峰であることを前提として議論を展開する。

2.1 離散的変位測定法

Fig. 1 の測定系において、発光素子を端から順に発光させ、 i 番目の発光素子 $p_i (i=1, 2, \dots, n)$ が発光しているとき、 j 番目の受光素子 $q_j (j=1, 2, \dots, m; m \geq n-1)$ の受光強度が最大になるとすると、そのとき、 $i: 1 \sim n$ のそれぞれについて番号 j に関する数値系列（最大受光数値系列、その1例を **Table 1** に示す）が得られるが、その最大受光数値系列を解読する

Fig. 1 Equivalent arrangement of displacement measuring system with Vernier scale

Table 1 An example of maximum intensity number sequence $j(i; x)$

p_i	x/Q ~0.1	0.1~ 0.3	0.3~ 0.5	0.5~ 0.7	0.7~ 0.9	0.9~
1	1	1	1	2	2	2
2	2	2	2	2	3	3
3	3	3	3	3	3	4
4	3	4	4	4	4	4
5	4	4	5	5	5	5
6	5	5	5	6	6	6

q_j $n=6$ for 1 pitch

と、次式の不等式で表わされる離散的区間として変位が求められる。

$$x_0 - \frac{Q}{2(n-1)} \leq x < x_0 + \frac{Q}{2(n-1)} \quad (2)$$

$$x_0 = \left\{ j(p_1) - 1 + \frac{(i^* - n/2)}{(n-1)} \right\} Q \quad (3)$$

ここで、 $j(p_1)$ は p_1 を発光させたとき、受光強度が最大になる受光素子の番号、 i^* は、同一受光素子が最大受光数値系列で連なって最大になる場合、最初に最大値をとるときの発光素子の番号を表わす。

2.2 アナログ的変位測定法

前述の離散的変位測定法により得られる結果は変位の大きさがある幅をもつ離散的区間として定められるため、(2)式を満足する範囲であれば、変位が異なっても同じ結果しか得られない。この意味では微小変位測定に分解能の点で一つの限界を与えることになる。

そこで、さらに離散的区間内での高分解能化を図るため、最大受光数値系列ばかりでなく、すべての受光素子の出力のアナログ値をもデータとして採用して信号処理を行うと、原理的にアナログ的変位測定が可能になる。

また、変位 x は離散的変位測定法で定められる離散的区間の中央値 x_0 と未知の成分である中央値からのずれ Δx との和で表わすことができる。

$$x = x_0 + \Delta x \quad (4)$$

さて、変位 x における受光素子の受光強度分布を、基準位置（ここでは区間の中央値 x_0 ）における発光素子と受光素子との光軸間の距離 η を横軸とする分布に直すと、この分布は(4)式により Δx のみに関する分布のずれに変換することができる。

なお、Fig. 1において、 i 番目の発光素子 p_i と j 番目の受光素子 q_j との、実際の変位 x における光軸間の距離 ξ_{ij} 、および、基準位置における光軸間の距離 η_{ij} は、おのこの次式で与えられる。

$$\xi_{ij} = \eta_{ij} - \Delta x \quad (5)$$

$$\eta_{ij} = (j-1)Q - (i-1)P - x_0 \quad (6)$$

ただし、 $i=1, 2, \dots, n$, $j=1, 2, \dots, m$

ここで、光軸間の距離 ξ_{ij} , η_{ij} に対する受光強度をそれぞれ $g(\xi_{ij})$ と $q(\eta_{ij})$ とすると、**Fig. 2** に示すように二つの分布の間には Δx だけのずれが生じる。著者らは、この分布のずれ Δx を求めるアルゴリズムとして、1次モーメント法と位相弁別法を提案してきた^{2), 3)}。

a) 1次モーメント法

基準位置における光軸間の距離 η_{ij} に対して受光強

微小光センサを横方向に配列したセンサアレイである。

なお、センサアレイの各素子の感度間には約10%くらいのばらつきが存在するため、各素子ごとにヘッドアンプのゲインを調整し、補正を行った。

3.3 機械系

Photo. 2 Overall outlook of the experimental measuring system

Fig. 4 Block diagram of the measuring system

Fig. 5 Timing chart of the data sampling

変位に関するパラメータを変化させる機構として、2個のマイクロメータ付きのメカニカルステージ（移動量； ± 25 mm, 最小読取；0.005 mm, 移動精度；0.005 mm）を用いて系を構成した。まず、センサアレイを X 軸ステージの上にステージ面と直交し、かつセンサ面が Y 軸ステージに向い合うように配置し、また Y 軸ステージには半導体レーザーの光軸と回転多面鏡の回転軸が一直線上にのるように発光系を配置し、ミラーからの反射光がセンサアレイ面上を走査するように系を構成した。

実際の変位測定において、センサ面とミラー面との距離 L を Y 軸マイクロメータにより設定し、X 軸マイクロメータにより変位 x を与えて測定を行った。系の構成の概観を Photo. 2 に示す。

3.4 信号処理系

計測系の全体的なブロックダイアグラムを Fig. 4 に示す。まず、基準時刻信号発生用のフォトインタラプタのパルス信号の立上りによりカウンタ回路にリセットを掛け、発光系のピッチ P に相当するように時間的に変換された各タイミング $t_i (i=1, 2, \dots, n)$ ごと

にデータ読取りのトリガが発生される。このトリガ信号によりセンサアレイの各素子から光-電変換された信号を検出し、A/D変換（変換速度；25 μ s）したのち、マイクロコンピュータ（16ビットマシン、クロック周波数；10 MHz）に取込み、前述のアルゴリズムに従いデータ処理を行って変位を算出する。

なお、タイミング t_i の間隔は回転多面鏡の回転数 R に反比例することから、タイミングの設定誤差の影響を軽減するため、回転多面鏡はある程度低速で駆動した。Fig. 5 にデータサンプリングのタイミングチャートを示す。

4. 実験結果および検討

4.1 実験

前章で述べたような測定系により、はじめに $x=0 \sim 0.5$ [mm], $n=11$, $Q=0.5$ [mm], $R=60$ [rpm], $L=22.5$ [mm]（この距離において、受光系における光束の半値幅が受光系のピッチ Q の2倍になるよ

う調整してある)の条件のもとに1ピッチ分の変位をピッチ Q の0.01倍のきざみで X 軸ステージのマイクロメータにより変位を与えながら、 $n \times m$ 個のデータをマイクロコンピュータに取込んで、1次モーメント法、位相弁別法の処理アルゴリズムにより変位を算出し、両者の結果について比較検討を行った。つぎに、 Y 軸ステージを動かして距離 L を5[mm]のきざみで変えながら、同じく1ピッチ分の変位に対して測定を行った。

4.2 結果および考察

実験結果の1例として、 $L=22.5$ [mm]の場合、1ピッチ Q にわたる変位に対する測定誤差の標準偏差をFig. 6に示す。これは同一変位に対して5回測定し、その誤差の標準偏差を計算してプロットしたものである。この結果から、測定誤差はおおよそピッチに対し、 10^{-2} のオーダーであり、1次モーメント法、位相弁別法についてはほぼ同一の精度が得られていることがわかった。既に報告した³⁾シミュレーション結果と対比

Fig. 6 Experimental error of displacement measurement over a range of one pitch at $L=22.5$ mm

すると、これは雑音レベルに換算して、最大受光強度の約数%の雑音がある場合の測定に相当する。

つぎに、Fig. 7に距離 L による測定誤差の変化の様子を示す。これは、それぞれの距離 L において、1ピッチ分の変位に対して測定を行い、その誤差の平均(○, □印)と最小, 最大誤差により誤差のばらつきの様子を示したものである。距離 L が大きくなるにつれて、1次モーメント法の結果は精度が悪くなるが、位相弁別法のほうはそれほど変わらない。これは L の増加とともに光束の広がりが大きくなり、1次モーメント法がその分雑音の影響を大きく受けているためである。このことから、雑音が存在するときには、位相弁別法が精度的にやや有利な処理アルゴリズムであることがわかった。

以上のデータは、1ピッチに渡る変位の範囲に対す

Fig. 7 Relationship between error and distance

Table 2 Performance and specification of the prototype measuring system

	Item	Contents		Remarks
Performance	Measuring range	5 [mm]		$\{m-(n-1)\}Q$
	Measuring accuracy	Vernier scale method; 50 [μm]		$Q/(n-1)$
		First order moment algorithm; $\pm 3 \sim 4$ [μm]	Phase discrimination algorithm; $\pm 3 \sim 4$ [μm]	Half-value width of light beam $W \approx 2Q$
	Measuring time	Data acquisition; one sampling per 1.2 rotation Data processing; about 1.8 [s]		Rotational speed; 60 [rpm] Number of mirrors; 10
Specification	Vernier scale	Light source	Wavelength; 780 [nm] Power; 5 [mW]	Laser diode
		Polygon mirror	Number of mirrors; 10 Reflectivity; 0.95	Rotational speed; 60 [rpm]
	Main scale	Peak wavelength; 840 [nm] Pitch; 0.5 [mm] Sensing area; 0.34 × 3 [mm ²] Number of elements; 20		Linear photo-sensor array

る実験結果である。2ピッチの変位に渡る実験結果も得られているが、ほぼ同様の結果になっており、この点と計測系の周期的構造を考えれば、その範囲内では同程度の直線性が得られるものと判断される。

最後に本研究で実現した測定系の仕様と性能をまとめたものを **Table 2** に示す。

5. む す び

本論文では、副尺の考え方を導入した新しい光学の変位計測系を提案し、実際にハードウェアとして半導体レーザー、回転多面鏡とフォトセンサアレイにより測定系を構成し、その有効性を実験的に確かめた。

また、高分解能化の信号処理法として、1次モーメ

ント法と位相弁別法を提案し、二つの方法について、精度的に比較検討した。その結果、位相弁別法のほうが雑音に強い信号処理法であることが確かめられた。

以上の結果から著者らが提案してきた測定系が精密測定法として有効であることが確認できた。

参 考 文 献

- 1) 盧, 山浦, 小林: 高分解能化のため副尺の考え方を導入した光学の変位計測系, 計測自動制御学会論文集, **21-6**, 653/655 (1985)
- 2) 盧, 山浦, 小林: 変位計測用副尺法におけるアナログ処理導入による高分解能化, 計測自動制御学会論文集, **21-12**, 1360/1362 (1985)
- 3) 盧, 山浦, 小林: 高精度変位計測のための副尺・位相弁別法, 計測自動制御学会論文集, **23-1**, 86/88 (1987)