高分解能化のため副尺の考え方を導入した 光学的変位計測系[†]

盧 度 煥*・山 浦 富 雄*・小 林 彬*

Introduction of Vernier Scale Concept to Optical Displacement Measuring System for Resolution Improvement

RHO Do HWAN*, Tomio YAMAURA* and Akira KOBAYASHI*

1. ま え が き

長さの測定に広く用いられているノギスなどの目盛は、主尺と副尺の2種類の粗い目盛により構成され、目視により主尺と副尺の目盛線の差が最も近いものを見出すことにより（合致法）目盛線のピッチ以上の分解能で長さの測定を行うことが可能である^{1),2)}。

本研究では、この副尺の考え方に着目し、主尺および副尺の目盛線に相当するものをそれぞれ発光素子、受光素子で置換して構成することにより、変位を目視でなく自動的に測定することを可能にする光学的変位計測系を提案する³⁾。

2. 計測系構成の考え方

副尺の考え方を導入した光学的変位計測系では、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訳であるが、その配置については種々の変形を考えることが可能であり、発想の展開をつぎに述べる。

まず、Fig. 1-b)に示すように互いに正対するように主尺としての受光系と副尺としての発光系を配置すると、ノギスと同様横方向への移動に関する変位を測定することができる。

つぎに、Fig. 1-c)に示すように発光素子および受光素子の光軸を傾けると、横方向および縦方向への変

位が測定可能な系となる。この場合、縦方向変位については、軸の傾きを大きくすると、縦変位に対する光束の横方向への移動量が大きくなるため、感度を上げ

Fig. 1 Arrangements of optical element arrays for displacement measuring system with Vernier scale

[†] 第27回自動制御連合講演会で発表（昭59・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 January 7, 1985)

(Revised March 5, 1985)

Key Words: Vernier scale, displacement measurement, high resolution, agreement method

ることができる。

さらに、Fig. 1-d) に示すように、光路を適当な平面（例えば、対象平面）で折り返せば、直射形でなく反射形の変位計測系を考えることもできる。

以上のような各配置において、発光素子の光束には適当な広がりがあり、受光素子は必要な指向性を持っている場合を考える。

発光素子を端から順に点灯させ、 i 番目の発光素子 p_i が点灯しているとき j 番目の受光素子 q_j の受光強度が最大になるとすると、 $i: 1 \sim n$ のそれぞれについて番号 j に関する数値系列（以下では最大受光数値系列と呼ぶ）が得られるが、後述するように、この最大受光数値系列を解読することによって変位を知ることができる。

合致法の元々の考え方からすれば、各 (i, j) の組合せにつき p_i と q_j が最も近接している組を見出す必要がある。例えば、各 i について、受光強度が最大になる素子の番号ばかりでなく、そのときの最大受光強度をも記憶し、最大受光強度間の比較を行うことなどが考えられる。しかし、この方法だと発光素子間の発光強度のばらつきや発光強度の経時変化による悪影響を大きく受ける計測系となることが十分予測され、合致法の考え方そのものを直接自動化することは必ずしも得策ではない。

本研究で提案する最大受光数値系列の解読に基づく方法は、その点が改善され、発光素子のばらつきや経時変化に強い系になっている。

3. 最大受光数値系列の解析

説明を簡単にするため、以下では Fig. 1-d) の構成を等価変換した Fig. 2 について考察する。

問題の要点は、系が任意の変位状態にあるとき、得られる最大受光数値系列を知ることである。

そこでまず、発光系と受光系のそれぞれのピッチの

Fig. 2 Equivalent situation of displacement measuring system shown in Fig. 1-d)

間の関係を次式で与える。

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

ただし、

n : 発光系の素子の個数

m : 受光系の素子の個数 ($m \geq n$)

P : 発光素子のピッチ

Q : 受光素子のピッチ

また、発光素子の発光分布、受光素子の指向性がそれぞれ軸対称で、単峰かつ光軸上で最大値を取るとする。このとき、発光素子 p_i を点灯させたとき、受光素子 q_j の受光強度が最大となる条件は、 q_j の x 座標が他の受光素子の x 座標よりも p_i の x 座標に近い位置を占めていることより、次式で与えられる。

$$X_{q_j} - Q/2 < X_{p_i} \leq X_{q_j} + Q/2 \quad (2)$$

ただし、 X_{p_i} および X_{q_j} は、それぞれ p_i および q_j の x 座標であり、また Fig. 1-d) における縦方向の変位 Δy に対応する Fig. 2 における横方向の変位を Δx とすると、それぞれつぎの関係にある。

$$X_{q_j} = (j-1)Q \quad (3)$$

$$X_{p_i} = \Delta x + \frac{n-2}{n-1}Q(i-1) \quad (4)$$

$$\Delta x = 2\Delta y \sin \theta \quad (5)$$

(2)式に(3),(4),(5)式を代入して、 j について整理すると、つぎようになる。

$$\frac{\Delta x}{Q} + \frac{n-2}{n-1}(i-1) + \frac{1}{2} \leq j < \frac{\Delta x}{Q} + \frac{n-2}{n-1}(i-1) + \frac{3}{2} \quad (6)$$

ここで、 j は整数であるので、ガウス記号 $[\cdot]$ を用いて書き直せば次式となる。

$$j = \left[\frac{\Delta x}{Q} + \frac{n-2}{n-1}(i-1) + \frac{3}{2} \right] \quad (7)$$

したがって、最大受光数値系列とは、(7)式において、 Δx を固定し、 i を 1 から n まで変えたとき得られる j に関する n 項組の数値系列のことである。

4. 離散の変位測定法

最大受光数値系列が得られると、これを解読することによって、変位 Δx の範囲が定められ、結果として離散の変位測定法が実現される。この解読法を例により説明するとつぎの通りである。

すなわち、Table 1 は、 $n=6$ の場合について、 i 番目の発光素子 p_i が点灯しているとき、 j 番目の受光素子 q_j の受光強度が最大となる変位 Δx の範囲を(7)式に基づき計算したものである。

Table 1 を分析し、変位 Δx の範囲

Table 1 An example of range of Δx correspond to (i, j) satisfying Eq. (7)

q_j	1	2	3	4	5
p_i					
1	$-\frac{5}{10} \leq \Delta x < \frac{5}{10}$	$\frac{5}{10} \leq \Delta x < \frac{15}{10}$	$\frac{15}{10} \leq \Delta x < \frac{25}{10}$	$\frac{25}{10} \leq \Delta x < \frac{35}{10}$	$\frac{35}{10} \leq \Delta x < \frac{45}{10}$
2	$-\frac{13}{10} \leq \Delta x < -\frac{3}{10}$	$-\frac{3}{10} \leq \Delta x < \frac{7}{10}$	$\frac{7}{10} \leq \Delta x < \frac{17}{10}$	$\frac{17}{10} \leq \Delta x < \frac{27}{10}$	$\frac{27}{10} \leq \Delta x < \frac{37}{10}$
3	$-\frac{21}{10} \leq \Delta x < -\frac{11}{10}$	$-\frac{11}{10} \leq \Delta x < -\frac{1}{10}$	$-\frac{1}{10} \leq \Delta x < \frac{9}{10}$	$\frac{9}{10} \leq \Delta x < \frac{19}{10}$	$\frac{19}{10} \leq \Delta x < \frac{29}{10}$
4	$-\frac{29}{10} \leq \Delta x < -\frac{19}{10}$	$-\frac{19}{10} \leq \Delta x < -\frac{9}{10}$	$-\frac{9}{10} \leq \Delta x < \frac{1}{10}$	$\frac{1}{10} \leq \Delta x < \frac{11}{10}$	$\frac{11}{10} \leq \Delta x < \frac{21}{10}$
5	$-\frac{37}{10} \leq \Delta x < -\frac{27}{10}$	$-\frac{27}{10} \leq \Delta x < -\frac{17}{10}$	$-\frac{17}{10} \leq \Delta x < -\frac{7}{10}$	$-\frac{7}{10} \leq \Delta x < \frac{3}{10}$	$\frac{3}{10} \leq \Delta x < \frac{13}{10}$
6	$-\frac{45}{10} \leq \Delta x < -\frac{35}{10}$	$-\frac{35}{10} \leq \Delta x < -\frac{25}{10}$	$-\frac{25}{10} \leq \Delta x < -\frac{15}{10}$	$-\frac{15}{10} \leq \Delta x < -\frac{5}{10}$	$-\frac{5}{10} \leq \Delta x < \frac{5}{10}$

 $Q=1, n=6$
Table 2 An example of maximum intensity number sequence $j(i; \Delta x)$

p_i	q_j					
	$\Delta x \sim 0.1$	$0.1 \sim 0.3$	$0.3 \sim 0.5$	$0.5 \sim 0.7$	$0.7 \sim 0.9$	$0.9 \sim$
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

 $Q=1, 0 \leq \Delta x < 1, n=6$

$$0 \leq \Delta x / Q < 1 \quad (8)$$

について最大受光数値系列を求めて見たものが **Table 2** である。なお、上の範囲以外の変位に対するものは $\Delta x / Q$ の整数部を表全体に加えた数値となる。

Table 2 において、最大受光数値系列は特定の变位区間に対し固有な系列になっていることが分る。

この数値系列から逆に対応する変位の区間を定めるには、1番目の発光素子 p_1 が発光したとき、受光強度が最大となる受光素子の番号を $j(p_1)$ とし、同じ受光素子が2回にわたって受光強度が最大となるものに関する発光素子の番号の内、若い方の番号を i^* とすると、その区間は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} [j(p_1) - 1] + \frac{i^* - n/2}{n-1} - \frac{1}{2(n-1)} \\ \leq \frac{\Delta x}{Q} < [j(p_1) - 1] + \frac{i^* - n/2}{n-1} + \frac{1}{2(n-1)} \end{aligned} \quad (9)$$

上式において、最左辺および最右辺の第1項は副尺の零目盛線に相当する p_1 が大局的にどの主尺の目盛の付近に位置しているかを表し、第2項は合致の状態にある目盛の位置を示しており、さらに第3項は合致の判断に伴う区間幅を意味している。

したがって、(9)式より、われわれの提案する方法によれば、主尺のピッチ Q の $1/(n-1)$ まで読取ることが可能であることがわかる。

なお、(9)式で与えられる変位を縦方向の変位に直すには(5)式を考慮すればよい。

5. あとがき

目視による副尺の読取りを自動化し、目盛の最小ピッチを越えた変位測定の高分解能化を図るため、発光・受光系よりなる光学的変位測定系を提案し、その理論的考察を行った。なおここでは、離散的方法について述べたが、信号処理においてアナログ的操作を加えればさらに高分解能化が期待できる。

参 考 文 献

- 岡田：光電式近接距離計，電子通信学会論文集，63-C-10，700/707 (1980)
- 北森：計測系の構造と機能，計測と制御，19-1，27/32 (1980)
- 盧度煥，他：副尺の考え方を考慮した光ファイバ変位計測系の基礎的研究，電気学会計測研究会資料，IM-84-20 (1984)