光点消失方式による不透明体の輪郭の位置の 検出法と精密気圧計への応用

三 宅 史

工業技術院計量研究所 東京都板橋区加賀 1-10-4

(昭和 44 年 1 月 21 日 受付)

A New Method of Detecting Contours of Opaque Bodies Using Extinction of Light Spots and Its Application to Precision Barometers

Fuhito MIYAKE

(National Research Laboratory of Metrology, Itabashi-ku, Tokyo)

(Received January 21, 1969)

A new detecting method and an optical element realizing the method are invented for the non-contact precise detection of positions of contours of opaque bodies. The method is applied to a barometer to detect the position of the mercury surfaces.

The principle of detection of this method is to catch the instant of disappearance of light in a dark field of view. This method has not the weaknesses which the usual sighting ring has intrinsically, that is, the disadvantages of penumbra, of diffraction of light, of double focussing and of finite aperture of sighting elements, and of dazzling light remaining in the field of view.

The optical element named Complex Slit is a set of slits composed of a triangular slit and a rectangular one, the component slits being fixed opposite to each other with sufficient spacing on a rigid body. The summit point of the triangular slit and the summit side of the rectangular one form the detecting plane. When the Complex Slit is driven so that the detecting plane approaches an object placed between the component slits, a triangular spot of light is formed by the silhouettes of the slits and that of the object. A sighting element follows to be kept in the extension of the detecting plane. While the approach proceeds, the sighting element observes that the light spot becomes smaller and smaller and then disappears. The position where the spot of light just disappears is adopted as the detecting point. The precision of detection of this method by unaided eye is proved to be several micrometres in terms of standard deviation, and the personal errors to be of the same order.

A self-calibrating type precision barometer with four Complex Slits is manufactured on trial, whose precision is proved to be about twelve micrometres.

1. 序 論

物体の位置を非接触的に検出する方法のひとつにすき見法¹⁾、すなわち、物体（発光しない）と検出器との間のすき間が見えなくなる瞬間を明るい面を背景として感知する方法があり、フォルトン形気圧計の水銀柱頭の位置ぎめに応用されているが、そのさいの誤差は $25\mu\text{m}$ より小さくないといわれ¹⁾、個人誤差も大きい。

すき見法の欠陥として次のものがあげられるであろう。

- i) 半影の重なりによる誤認。
- ii) 明視野観察であるために生ずる判定困難と回析の悪影響。
- iii) 焦点合わせの問題に関連するさまざまな不都合。

これらの困難を克服するための考察から、別の検出

法（光点消失法）が考案された．その原理，精度の実験の評価および気圧計への応用の結果について報告する．

2. 光点消失法の原理

光点消失の判定は，Fig. 1 に示す構成の検出器で

Fig. 1 Principle of detection with a complex slit

なされる．一体に配置された2個のスリットの組（複合スリットと名づける）の間に対象が置かれる．一方のスリットは開角およそ 60° の切り込みから成る三角スリット，他方は頂辺およそ 1 mm の長方形スリットである．この角度と幅は，肉眼観測の場合の最適条件として，実験的に選ばれた．

三角スリットの頂点と長方スリットの短辺とが張る平面が検出面をなし，複合スリット全体は検出面に垂直な方向に移動される．観測器を検出面内に保ちつつ三角スリットの頂点を望みながら，検出面を対象の位置ぎめ点に近づけると，観測器に向かう光は長方スリットにもさえぎられて細くなってゆく．ついには光が点になり消失して視野は真暗になる．この消失位置をとらえれば，対象の位置は検出器の位置に変換されたことになる．そのさい平行光束を用いてもよいが，発散光束を用いるほうがむしろ有利である．

3. 実験

スリット距離 20 mm の複合スリットが試作され，それによる検出の精度が評価された．対象としてマイクロメータヘッドのスピンドルの端面が採用された．

両者とも手動ハンドルで検出面法線方向へなめらかに送られる．ハンドル（直径 50 mm ）1回転による送りは，複合スリットについては 2 mm ，マイクロメータについては 0.5 mm である．

けい光灯（ 4 W ，輝度 $0.3\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ）からの光を緑色ビニールテープをへて入射させ，視野内の迷光は十分に排除し，室内は暗くして，裸眼検出の精度を調べた．

A) 複合スリットを固定した場合 任意の位置に固定された複合スリットの間へマイクロメータのスピンドルをくり出し，光束消失時にマイクロメータの回転を止めてそのときのマイクロメータの目盛を読む．3人の実験者（K, L, M）が交互に観測・読み取り・記録を受けもった．4シリーズの実験の結果を Table 1 に示す．

B) 複合スリットを送る場合 マイクロメータを任意の目盛にセットしそのときの目盛を読んでおく．複合スリットを下げてゆき光点消失の位置でそれを止める．次にマイクロメータを逆転して光を通したのち順転を行なって光点消失時のマイクロメータ目盛を読む．この逆転・順転・読み取りを5回くりかえして得た5個の読みの平均をもって，1連の実験の結果とした．10連の実験（Mひとりによる）の結果を Table 2 に示す．マイクロメータの初めの位置は，A) の場合との関連から， 10.360 mm に選ばれている．

写真によって光点消失過程を分析することが試みられた（Fig. 2 参照）．マイクロメータを初期位置（ 10.360 mm ）にセットし，複合スリットを送って検出面をスピンドル先端に合わせ，スピンドルを逆転ついで順転して，目盛を次に示す値それぞれに進めたときに光点を撮影した．a) 10.460 ，b) 10.380 ，c) 10.375 ，d) 10.370 ，e) 10.365 ，f) 10.360 ，g) 10.355 ．それぞれの場合の光点（三角形）の高さは，

series	I			II			III			IV			sup.
observer	K	L	M	K	L	M	K	L	M	K	L	M	K
time of beginnings	11 h 18m 25 34			43 49 55			12 h 07m 12 18			25 32 38			(48)
observation 1	73	56	64	58	61	68	55	49	66	57	68	61	(63)
	49	59	65	50	56	64	63	52	67	62	51	68	(51)
	59	57	67	67	61	59	64	53	58	63	47	70	(55)
	63	59	64	53	56	57	51	47	68	62	46	60	(60)
	60	56	69	55	59	66	62	61	70	64	53	70	(53)
average	60 ₈	57 ₄	65 ₈	56 ₆	58 ₆	62 ₈	59 ₀	52 ₄	56 ₈	61 ₆	53 ₀	65 ₈	(56 ₄)
error : σ	8 ₇	1 ₇	2 ₂	6 ₆	2 ₆	4 ₇	5 ₇	5 ₄	4 ₇	2 ₈	8 ₆	5 ₀	(5 ₁)

Table 1 The position of a detecting plane when a complex slit is fixed and a spindle of a micrometer is driven upwards to detect the position. Only the fractions over 10.300 mm of the readings are shown (unit : μm)

	settings of complex slit to a terminal plane of spindle										mean
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	
time of setting	15 h 44m	51	56	02m	08	12	18	22	26	33	
obs. 1	62	60	54	47	52	66	70	60	55	64	
2	63	60	53	58	54	65	65	60	70	74	
3	65	59	53	62	61	73	58	62	51	64	
4	65	59	57	61	58	73	65	59	57	60	
5	58	60	50	51	59	61	66	57	52	68	
average	62 ₆	59 ₆	53 ₄	55 ₈	56 ₈	67 ₆	64 ₈	59 ₈	57 ₀	66 ₀	60 ₈
error: σ	3 ₀	0 ₉	2 ₃	6 ₆	3 ₈	5 ₃	4 ₄	2 ₀	4 ₁	5 ₃	4 ₈

Table 2 The positions of a detecting plane when a complex slit is driven to detect the position of a micrometer which has been previously fixed at 10.360 mm. Only fractions over 10.300 mm are shown (unit: μm)

順に 100, 20, 15, 10, 5, 0, $-5\mu\text{m}$ (負号は見かけの貫入の状態)である. $F: 3.5$, $f: 55\text{mm}$, フィルム感度 JIS, ASA 100, 露出 20 min とした. h) は, 目盛が 10.410 mm のとき, すなわちすき間が $50\mu\text{m}$ のとき, $F: 22$, 露出 10 min で撮影された. 2 個の光点の存在は肉眼観測でも認められた. i) はすき間が 1 mm のとき ($F: 22$, 露出 4 s) であるが, 三角の光点のほかに, スピンドル端面によるその反射像も認められる. j)~l) は, カメラ位置を上下にずらして撮影されたもの ($F: 3.5$, 露出 20 min) であって, k) は a)~i) のときの位置で, j), l) はカメ

ラをそれぞれ上げまたは下げて撮影された. カメラ位置と写真像位置とはよく対応しており, 光点消失判定は観測位置の口径内での上下に影響されることなく正に行なわれることが確認された.

なお肉眼観測にさいして認められる光点は, ここに図示した写真よりもはるかにめいりょうである.

4. 検 討

実験 A の結果 (Table 1) によれば, 各人各シリーズの観測精度は標準偏差で表わして $6\mu\text{m}$ の程度である. また, 1 観測者たとえば M のシリーズ平均の精度は標準偏差で $2\mu\text{m}$ を越えない.

いっぽう実験 B の結果 (Table 2) によれば, 観測者 M の 1 連 (5 回の読み) の標準偏差は $6\mu\text{m}$ 程度であって, 実験 A の 1 シリーズのそれと同程度であるが, 実験 B の 10 連の平均値の標準偏差は $5\mu\text{m}$ 程度であって, 上記の実験 A (観測者 M) のシリーズ平均のそれ ($2\mu\text{m}$) の 2.5 倍ほどになっている. この 2.5 というファクタは, 実験 A (検出面固定) の場合に比べて実験 B (検出面移動) の場合のほうが不利であることの度合を示すものとも考えられるが, あるいはまた, 前述の送りの比 (3. 参照) に対応するものとも考えられる. ハンドルの手による最小調節能力を接線方向に 0.3mm とすると, 送りの調節精度は実験 A, 実験 B においてそれぞれ $1\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$ となるからである.

いずれにしても 1 シリーズあるいは 1 連の観測の精度は, 標準偏差で表わせば $6\mu\text{m}$ のオーダーと評価される.

視感の暗順応の問題については, 実験 A の観測者 K の第 1 シリーズ (暗い測定室にはいった直後に開始) の結果が参考になる. その平均値は, 同人の他のシリ

Fig. 2 Photographs of light spots seen during the process of detecting position of the terminal plane of the spindle of a micrometer. The visual gap between the detecting plane of the slit and the terminal plane are a) 100, b) 20, c) 15, d) 10, e) 5, f) 0, and g) -5 micrometers, respectively (film: ASA, 100, $F: 3.5$, exposure: 20 min). h) is taken with smaller stop ($F: 22$, exp. 10 min) when the gap is $50\mu\text{m}$, the image being splitted in two as is seen by unaided eye. i) is the image of the triangular slit (upper half) and its reflection on the terminal plane when the gap is 1 mm ($F: 22$, exp. 4 s). j), k) and l) are taken after the position of camera is changed step by step, the gap being $50\mu\text{m}$ ($F: 3.5$, exp. 20 min)

ーズ（じゅうぶんに暗順応している）の平均値と $13\ \mu\text{m}$ となる．実用上では無視されるものであろうが，注意しておく必要はあろう．

肉眼観測の結果と写真判定の結果とは，よく照合している．なお Fig. 3 は，実験に用いられた三角スリ

Fig. 3 Microscopic photograph of the summit of the triangular slit composing a complex slit

ット（写真法で製作した）の頂部の拡大写真であるが，頂部の丸み（曲率半径および $30\ \mu\text{m}$ ）をなくし，かつ，境界が鮮明な三角スリットを用いれば観測精度はさらに向上するであろうことが，この写真で暗示されていると思われる．

5. 応用例——自己校正形の精密気圧計

5.1 目的

複合スリットを用いて光点の消失点をとらえる検出法は，不透明体の輪郭の位置・形状の精密測定，ひいては物体の1次元の変位の簡単な測定に応用される．水銀自由表面の落差の検出にこの方法を用いた精密気圧計が試作されたので，その検出機能をここで略述する．この気圧計では同時に固体端面の検出にもこの方法が用いられている．なお，試作気圧計についての詳細は別に報告する予定であるが，複合スリットによる検出法を用いた結果，精度のよい落差標示器を内蔵する自己校正形式が実現され，したがって，他の標準気圧計との比較校正によることなく測定の信頼性を確保することができた．

5.2 構造と測定方法

試作器は感圧・検出・測長の独立の3部から成る（Fig. 4）．感圧部はサイフォン形の水銀柱で，観測部分のガラス管の内径は $31\ \text{mm}$ である．測長部は支柱の上下に取り付けられた2個のマイクロメータヘッドから成り，ともに上向きスピンドルによって全体と

Fig. 4 Outline (left) and photograph (right) of a barometer with four complex slits

して $690\sim 790\ \text{mm}$ の範囲の落差が測定できる．

検出部には，上述の複合スリットを左右に備えた上下2台の架台とその操作機構とが設けられている．これを支える支柱は感圧部と測長部との中間に立てられ，各架台には感圧部側と測長部側とにそれぞれ複合スリットが付いていて，水銀柱とスピンドルをはさんでいる．架台の左右の複合スリットの間隔は $90\ \text{mm}$ ，複合スリットを構成する前後のスリットの間隔は，感圧部側 $55\ \text{mm}$ ，測長部側 $20\ \text{mm}$ とし，左右の複合スリットの検出面が同一平面にくるように配置された．三角スリットは写真法で製作された．

換気装置付きのケースに全体をおさめ，観測用光源としての $4\ \text{W}$ けい光灯をケース左横の外側に設け，その光は緑色フィルタと反射板とをへて複合スリットの三角スリットの裏側から長方形スリットに抜け，観測器に入射する．

感圧部側の複合スリットを通して光源を望みながら検出部の架台を上方から下方に送り，検出面を水銀の自由表面の頂点と接しさせる．次いで，測長部側の複合スリットを望みながら，マイクロメータのスピンドルを下から上に送り，その端面を検出面に合致させ，そのときのマイクロメータの目盛を読む．以上の2段階の操作により，水銀柱の落差は測長器の目盛に変換される．上下のマイクロメータが，スピンドルが最も長く出ているときゼロになるように目盛られているため，落差 h は次式で与えられる．

$$h = H - (m_a - m_b)$$

ここに， H はマイクロメータの目盛が上下ともゼロの

ときのスピンドル端面同士の間隔, m_a, m_b はそれぞれ上および下のマイクロメータの読み取り値である。

5.3 性能試験

試作気圧計は計量研究所の光波干渉式標準気圧計²⁾と比較され, 測定精度の評価がなされた。求められたものは上下のマイクロメータの間隔の 20°C における値 H_{20} であり, これを通じて 4 個の複合スリットを用いた検出方法が試験される。検査は両気圧計の大気室同士を連結した場合 (a) と, ともに大気に開放した場合 (b) の 2 種類行なわれる。a においては気圧の刻々の変化の追従性の比較から, b においては異なった時点における大気圧の短時間の測定値群の比較から, 複合スリット群の総計的測定精度が求められる。実験の手順と結果は次のとおりである。観測は裸眼による。

a) 両大気室を直結した場合 実験結果の 2 例を Table 3 と Fig. 5 に示す。

P_0 は温度および高度差補正のなされた後の光波干渉式気圧計による測定値である。得られた測定精度は標準偏差で表わして $6\ \mu\text{m}$ の程度である。

b) 両大気室を大気に解放した場合 観測者の放射熱の影響を避けるため, 観測は時間をおいて行なわれた。短い観測時間中にも大気圧が刻々と変化していることを考慮し, 測定は次の要領で行なわれた。試作気圧計の大気室は開放されたままとし, 光波干渉気圧

Fig. 5 Comparison between an interferometric barometer and a barometer with complex slits with respect to pressure change, P_0 (dashed line) showing the value observed by the former

計は検出の便宜上測定時に大気から切り離された。試作気圧計の検出を真空側自由表面, 大気側自由表面, 真空側自由表面の順で 3 点行なうこととし, 切り離しは大気側自由表面の検出の瞬間に光波干渉式気圧計の活せんを閉じるという手順で行なう。この実験では, 上下の温度計に二重管式の 1 目 $0.1\ \text{deg}$ の器差づけられたものが用いられている。ケースの上に換気扇が取り付けられ, 上下の温度差は $0.01\ \text{deg}$ 以下である。測定結果は Table 4 に示されている。実験の前後にわたり, 隣室にある感度が $20\ \mu\text{mHg}$ の電気抵抗式自記気圧計により大気圧変動が記録された (Fig. 6)。

測定結果から, H_{20} として $740.033\ \text{mm}$ が得られ, 測定精度は標準偏差で表わして $12\ \mu\text{m}$ の程度である。

5.4 検計——すき見法との比較

以上の実験にさいして, 温度変化や地震動の影響などの, 気圧測定上の諸問題についてもいくつかの新しい知見が得られたが, 光点消失法の応用例という見地からの検討結果だけを採り上げるならば, 実験 b で得られた精度の $12\ \mu\text{m}$ という値が, 1 個の複合スリットの精度 $6\ \mu\text{m}$ (既述 4. 参照) という値とよく見合っている点は, 意義深いものといえよう。

最後に, 従来のすき見法による気圧測定との比較実験について述べる。市販のフォルタン形気圧計の観測窓を二分し, 半分はもとのままにしてすき見環による観測に用い, 他の半分には黒色ビニールテープ製の簡素な複合スリットを

Fig. 6 The atmospheric pressure change during the comparison shown in table 4, observed with an automatic barometer of an electric resistance type

time	pressure	micrometer's readings (mm)			scale const.
[h] [m]	P_0 [mmHg]	m_a	m_b	$m_b - m_a$	H_{20} [mm]
14. 36	(interferometric barometer)	10.324			
38			41.149	30.828	
41	768.435	318		816	740.032
43	439		124	809	043
45	440		136	824	032
48	443	309		832	031
50	443	306		838	027
52	446		147	848	021
54	449		144	852	023
55	451	289		855	023
57	451	297		848	032
59	453		146	850	032
15. 01	457		158	864	025
05	464	292		872	028
08	469	292		876	032
12	471		174	891	023
16	484	274		895	035
20	(interpolated)	273		mean	740.033
22			163		± 0.006

Table 3 Comparison between an interferometric barometer and a barometer with complex slits. The pressure cells of both being connected with a glass tubing

time	temp.	P_0	m_a	m_b	H_{20}
[h] [m]	[°C]	[mm Hg]	[mm]	[mm]	[mm]
14. 25	24.98		16.412		
27		762.501	(16.419)	42.275	740.037
29	25.01		16.425		
15. 07	25.14		16.503		
10		762.212	(16.523)	42.133	740.013
13	25.16		16.543		
15. 47	25.26		16.451		
49		762.299	(16.474)	42.153	740.046
53			16.497		(omitted because of an earthquake-like phenomena)
56				42.134	
58	25.31		16.480		
16. 35	25.39		16.389		
37		762.492	(16.368)	42.266	740.038
40			16.347		
43	25.42			42.332	
17. 24	25.51		16.220		
27		762.801	(16.219)	42.435	740.044
29			16.218		
32	25.52			42.455	
mean	$\bar{H}_0 = 740.033 \pm 0.012$				

Table 4 Comparison between the barometer with complex slits and an interferometric barometer, with the pressure cells of both being opened to the atmosphere

付けて光点消失法による観測に用い、2つの方法によって、気圧計真空側自由表面の位置の変化を観測した(Fig. 7)。すき見環の場合には室内照明を付けたが、複合スリットの場合には室内を暗くした(ただし迷光は除かれていない)。

実験は2名(K, M)が1対ずつ交互に行なった。図からわかるように、複合スリットによる場合、観測値のその最近似直線からの偏差は、読み取り間隔の範囲

Fig. 7 Effect of the complex slit applied to a usual Fortin barometer. The sighting ring is divided in two parts, to one of which a simple complex slit is fitted and the other is left as it was but with the half width. The solid circles, and the open ones correspond to experimental data using the complex slit, the usual sighting ring, respectively. The solid line and dashed one represent the observation equations of the data of the former method, of the latter method, respectively

内に納まっている。これは、測定誤差の主因が検出機構にあるのではないことを示している。

総合的に見て、すき見法よりも光点消失法のほうが有利であることは明らかである。

6. 結 論

複合スリットは、検出の対象とともに、検出点の周囲に暗視野を形成し、その中で光が消えて行くのを追跡し、究極においては暗い視野の中に光点が見えるか否かを判定することをもって検出原理とする。これは半影の影響を受けず、検出点自体が最後に残る光点であるため、周囲から強い光を受けることもなく、さらに焦点合わせの問題も本質的にもたない、また、観測器全体をひとつの感光素子として使っていることは、感光素子の寸法から脱脚し、感度を良くするのに有利であり、また観測器の感光特性の極小単位、すなわち感じるか否かの境界を利用するので、随伴する検出誤差もその単位と同程度の光量に対応したものになる。有限な大きさの光点から出発し、無限小に導びく検出法は人間工学的にも理にかなっており、発散面光源を積極的に使えることも利点である。

測定精度は、個人誤差とともに、標準偏差で表わして数 μm であることが、実験により示された。しかしこれは三角スリットの作り方の改良、送り速度の人間工学的検討により、なお向上できると考えられる。

複合スリットによる光点消失式検出法の応用例としての気圧計の測定誤差が、光波干渉式気圧計(精度 $2.4 \mu\text{mHg}$)との比較の結果として、標準偏差で表わして $12 \mu\text{mHg}$ 程度であることが実証された。このことは複合スリット 1 個による検出の精度が数 μm であることを示していると見てよい。また、複合スリットを使うことにより自己校正形式が簡単に実現でき、上記の精度を常時保つことが可能となる。従来の気圧計の検出精度を良くする方法としても光点消失方式は有力である。

最後に、本研究において、とりわけ試作気圧計の設計のさいに有益な助言をいただいた計量研究所の小林好夫氏、実験に協力してくださった同じく内川恵三郎氏、ならびに同所圧力研究室の金田良作氏、須藤清二氏、西端 健氏に対し深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) W. G. Brombacher, D. P. Johnson and J. L. Cross : Mercury Barometers and Manometers, NBS Monograph 8, 1/59 (1960)
- 2) R. Kaneda, S. Sudo and K. Nishibata : An Interferometric Primary Standard Barometer, Bulletin of the N. R. L. M., Series No. 9, 24/36 (1964)