光学式仮想Vブロック方式による 真円度評価システムの開発 (第1報)*

— 測定原理と測定限界のシミュレーション結果 —

横田篤也** 山田隆一*** 柳 和久† 坂井 誠††

Development of Roundness Measurement System
by Optical V-block Method (1st Report)
— Measuring Principle and Simulation Results of Measurement Limit —

Atsuya YOKOTA, Ryuichi YAMADA, Kazuhisa YANAGI and Makoto SAKAI

Roundness measurement by mechanical V-block method is simple and widely used in industry. However, work surface to be measured may be scratched by the friction between the cylinder work and V-block support and the roundness evaluation is restricted to one cross section because it is based on the three-point measurement system. The optical V-block method by which perfect non-contact measurement can be achieved is proposed and its measuring principle is described in this paper. The measuring error and measurable wavelength/amplitude are made clear by geometrical consideration and some simulation results are presented. This system is also expandable to the cylindricity evaluation and its implementation is shown.

Key words: V-block method, roundness, cylindricity, three-point measurement, optical measurement

1. 緒 言

近年の加工技術の発展に伴い、加工部品の幾何形状精度は品質管理の重要項目となっている。大量生産される部品の精度を高めるためには、オンマシン/インラインでの全数形状精度測定が望ましいが、真円度測定においては、円筒部品を支持、回転させる機構が必要であり、その回転精度が測定精度に影響するため、オンマシン/インラインでの測定は非常に難しいものとなっている。

円筒形状部品の真円度ならびに円筒度の測定には、通常半径法による触針式測定機が用いられることが多い。この測定機は現在最も高精度な真円度および円筒度測定が可能であるが、触針と円筒部品の摩擦により、円筒部品に傷を付ける危険がある。また、スピンドルの回転誤差が直接測定誤差となるため、高精度な回転支持機構が必要とされる。したがって、生産ラインにおける真円度測定への触針式測定機の適用は困難である。

形状誤差成分と回転誤差成分とを分離して測定することのできる測定法として、3点法が広く研究されてきた^{1)~5)}。この方法は3本の変位計をある設定角度に配置し、それぞれの変位計の出力信号から調和解析により真円度形状を求めるものであるが、変位計の設置位置や設置角度の誤差により調和解

析における拡大係数が影響を受けやすい。また、回転精度の影響を完全に除去することはできない。多点法⁶⁾、混合法⁷⁾、直交法⁸⁾などの3点法の改良も行われ、測定精度や感度面での成果は上げられているが、オンマシン/インラインでの形状測定という観点からは問題は解決されていない。

3点法の中でも、特にVブロック法を用いた真円度測定は支持部への円筒部品の着脱が容易であることから、オンマシン/インライン測定に適していると思われる。さらに、固定Vブロック上で円筒部品を回転させて測定を行うため、本質的に回転誤差の影響を受けないという長所を持っている⁹⁾。しかしながら、支持部との摩擦により円筒部品が損傷すること、および3点法の原理から支持断面内でしか測定が行えないことなどの問題点も有している。

そこで本研究では、従来のVブロック法の欠点を改良した光学式仮想Vブロック方式による真円度測定システムの開発を試みた。本測定システムは真円度プロファイル測定用としての光学式変位計と、固定Vブロックの代用として仮想Vブロックを構成する2本の光学式変位計とを組み合わせた構造としている。

第1報となる本報では、まず光学式仮想Vブロック方式による真円度測定原理を提示する。続いて光学式変位計による測定限界をシミュレーションにより明らかにする。さらに、本測定システムによる円筒度測定への拡張の可能性を示す。

2. 光学式仮想Vブロックによる真円度測定の原理

2.1 従来の固定Vブロック法

Vブロック法による真円度測定は従来より検討されており、米津による拡張Vブロック法⁷⁾を用いれば多くの周波数(山数)で良好な拡大係数が得られることが分かっている。この

*原稿受付 平成11年5月31日

**学生会員 長岡技術科学大学大学院 (長岡市上富岡 1603-1)

***正会員 長岡工業高等専門学校 (長岡市西片貝町 888)

†正会員 長岡技術科学大学工学部

††正会員 (株)東京精密 八王子工場 (八王子市石川町 2968-2)

Fig. 1 Weak points of mechanical V-block method

方法は任意の角度のVブロックと1本の変位計があれば真円度測定を行うことが可能であり、測定精度は円筒部品の回転精度に依存しない。また、半径法と比較して支持部への円筒部品の着脱が容易であり、簡便な真円度測定に有効であると考えられる。

しかしながら、図1に示すように、固定Vブロック法による真円度測定では、1) Vブロック上に設置した円筒部品を回転させるため、両者の接点において摩擦による表面損傷を生ずる、2) Vブロックが円筒部品を支持する構造のため、円筒部品の支持断面以外では真円度測定が行えない、等の問題があった。筆者らは先に、オンマシン/インライン測定を目的とした修正Vブロック方式による円筒部品の真円度と曲がりの光学式同時測定システムの開発を行った⁹⁾。この測定システムではベアリングを用いて円筒部品と支持部を滑らかに回転させることで、1)の問題をある程度解決することが出来た。しかしながら、依然として円筒部品と支持部の接触が避けられなかっただけでなく、2)の問題はまったく解決されなかった。また、ベアリングの回転誤差により、測定基準となる仮想Vブロックが変動し、その結果拡大係数が影響を受けるという測定精度上の問題があった。

2.2 光学式仮想Vブロック法

光学式変位計を組み合わせた仮想Vブロックを用いることにより、上記 1) 2) の問題を解決することができる。

図2に従来の固定Vブロック法と光学式仮想Vブロック法の幾何学的構成を示す。図2(a)は従来の固定Vブロック法であり、挟角 α のVブロック上に円筒部品を配置し、Vブロックの垂線から角度 β の位置に設置した光学式変位計で $E_{original}$ を測定する。この $E_{original}$ をフーリエ級数展開し、調和解析を行うことで真円度形状を得ることができる。図2(b)は光学式仮想Vブロック法の場合である。ここでは、固定Vブロックを光学式変位計を用いた仮想Vブロックに置き換えている。光学式仮想Vブロック法では、固定Vブロック法と異なり回転支持機構が分離されているので、変位計で測定される変位には回転誤差成分が含まれることに注意する必要がある。

光学式変位計を用いた仮想Vブロック方式の特徴は以下のとおりである。A) 測定断面において完全に非接触測定が行える。B) 円筒部品の支持機能を失ったかわりに独立した回転支持機構を設けることで、円筒部品の支持方法を測定対象にあわせて選択できるようになる。C) 測定断面と回転支持機構とを分離したことにより、測定断面を円筒部品回転軸方向の任意の位置に設定することができる。D) 仮想Vブロックを構成する光ビームの幅を固定Vブロックの幅より相当程度小さくできるので、円筒物体の軸方向の真円度分布がより詳細に

(a) Mechanical V-block

(b) Optical V-block

Fig. 2 Geometrical configuration of V-block method

求められる。加えて、測定装置への円筒部品の設置の容易さ、円筒部品の回転精度に無関係な測定精度など、従来の固定Vブロック法の利点はまったく損なわれない。

2.3 回転誤差の補正

図2(b)において、仮想Vブロックを構成する光学式変位計 R, L で測定される変位をそれぞれ S_R , S_L 、また、光学式変位計 U で測定される変位を S_U とする。これらの変位には真円度形状成分 r_R , r_L , r_U 及び回転誤差成分 δ_R , δ_L , δ_U が含まれる。このとき、仮想Vブロックの谷から変位計 U までの距離 E は式(1)で示される。

$$E = S_U + \frac{\cos \beta}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} (S_L + S_R) + \frac{\sin \beta}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} (S_L - S_R) \\ = \left(r_U + \frac{\cos \beta}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} (r_L + r_R) + \frac{\sin \beta}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} (r_L - r_R) \right) \\ + \left(\delta_U + \frac{\cos \beta}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} (\delta_L + \delta_R) + \frac{\sin \beta}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} (\delta_L - \delta_R) \right) \quad (1)$$

図3は、回転誤差の補正方法を明らかにするための図である。図中に実線で示された初期状態から、円筒部品が回転することにより、破線で示されたような状態に移行するものとする。このとき上部変位計には回転誤差成分と形状誤差成分が同時に現れる。ここで、円筒部品が回転せずに平行移動した状態、

Fig.3 Measured cross section by optical V-block method

すなわち回転誤差のみを想定した状態（一点鎖線）を考えると、平行移動しただけであるから測定される E は初期の値と同一である。また、各変位計には回転誤差に相当する変位が検出される。その平行移動状態から仮想Vブロックを固定して円筒部品を回転させると、上部変位計には形状誤差成分が検出され、仮想Vブロックを構成する変位計にはVブロック法の原理より形状誤差成分が現れない。よって E は固定Vブロック法と同一になることがわかる。

以上より、仮想Vブロックを構成する変位計 R 、 L に現れる変位は回転誤差成分であること、および回転誤差を導入しても E には回転誤差成分が含まれないことが示された。そこで式(2)、式(3)が成り立つ

$$S_R = \delta_R, \quad S_L = \delta_L \quad (2)$$

$$\delta_U + \frac{\cos \beta}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} (\delta_L + \delta_R) + \frac{\sin \beta}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} (\delta_L - \delta_R) = 0 \quad (3)$$

式(2)、式(3)より

$$\delta_U = -\frac{\cos \beta}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} (S_L + S_R) - \frac{\sin \beta}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} (S_L - S_R) \quad (4)$$

として仮想Vブロックの変位 S_R 、 S_L より回転誤差の影響を補正できることが分かる。

3. 接線式変位計による真円度測定と誤差

3.1 変位計の方式と回転誤差の影響

今回使用する変位計は、透過型エッジ位置検出法⁹⁾を用いた光学式変位計である。この測定方法は、レーザダイオードなどの光源から発振された平行ビームを物体エッジと垂直に照射し、エッジによって一部さえぎった後、フォトディテクタなどの受光素子によって受光すると、レーザビームのさえぎり量によって受光量が変化することを利用する変位測定方法である。ここでは、便宜上これを接線式変位計と呼ぶ。また、触針式変位計のように回転中心に向けた変位計が半径方向の変位を測定するものを法線式変位計と呼ぶ。図4は2つの方式の変位計について、変位方向と直交する方向に回転誤差が現れた場合の変位計が受ける影響を示したものである。同図より接線式変位計はまったく影響を受けないが、法線式変位計は直接的な影響を受けることがわかる。

3点法は、半径方向以外の変位の影響が微小になるように工夫された真円度測定法であるが、影響を完全に排除することはできない。円筒部品の回転精度が悪くなると半径方向以外の変位も大きくなるため、測定誤差が大きくなる。ところが、接線式変位計は半径方向と直交する方向、すなわち接線方向の変位に対して感度が現れない。つまり、この方式の変

Fig.4 Two different types of displacement probe

Fig.5 Roundness profile with single undulation

位計で3点法による真円度測定を行う場合、回転誤差の影響をまったく受けない真円度測定が可能である。そのため、2本の接線式光学変位計を組み合わせる仮想Vブロックとすることにより、回転精度の悪い機構に取り付けられた円筒部品であっても、その真円度を高精度かつ非接触で測定することが可能である。また、この方法によれば回転中心の偏心も測定精度に影響を及ぼさないため、支持回転機構として工作機械の主軸などを想定した場合でも測定システムを工作機械に取り付ける作業を容易にできる。一方、法線式変位計の場合、回転誤差の影響を完全に除去することはできないため、測定誤差を小さくするためには接線式変位計を用いる場合に比べて、より回転精度の高い回転支持機構を必要とする。

3.2 単一周波数からなる真円度プロファイルの測定限界

単一周波数からなる真円度プロファイルを接線式変位計を用いて測定する場合、幾何学的条件から測定可能な周波数(山数)と振幅の関係が制限される。

いま、極座標系において図5に示すような振幅 W_c 、周波数 n なる周期的正弦波うねりを持ち、 $\phi=0$ に谷底がくるような平均半径 R の真円度プロファイル $r(\phi)$ を式(5)で表す。

$$r(\phi) = R - \frac{W_c}{2} \cos(n\phi) \quad (5)$$

この真円度プロファイルの谷底 ($\phi=0$) における曲率中心が真円度プロファイルより内側にあるときのみ、谷底にレーザビームが接することができる。

この真円度プロファイル $r(\phi)$ の曲率半径 $r_c(\phi)$ は以下のように表される。

$$r_c(\phi) = \frac{\left(r(\phi)^2 + \left(\frac{dr(\phi)}{d\phi} \right)^2 \right)}{r(\phi)^2 + 2 \left(\frac{dr(\phi)}{d\phi} \right)^2 - r(\phi) \frac{d^2 r(\phi)}{d\phi^2}} \quad (6)$$

曲率中心が真円度プロファイルより内側にあるという条件は言い換えれば曲率半径 $r_c(\phi)$ が正の値を持つということである。つまり、 $r_c(\phi) \geq 0$ のとき、曲率中心は真円度プロファイルの内側にあり、 $r_c(\phi) < 0$ のときには曲率中心は真円度プロファイルの外側にある。よって測定可能であるためには式

Fig. 6 Restriction curve of measurable amplitude

(6)より以下の条件を満たせばよい。

$$0 \leq \frac{r(\phi)^2 + \left(\frac{dr(\phi)}{d\phi}\right)^2}{r(\phi)^2 + 2\left(\frac{dr(\phi)}{d\phi}\right)^2 - r(\phi)\frac{d^2r(\phi)}{d\phi^2}} \quad (7)$$

式(7)に式(5)を代入し、 $\phi=0$ でこれを解くと

$$\frac{W_t}{R} \leq \frac{2}{(1+n^2)} \quad (8)$$

を得ることができる。図6は式(8)をグラフ化したものである。横軸は周波数 n 、縦軸は真円度プロファイルの平均半径 R で一般化した振幅 W_t である。単一周波数成分からなる真円度プロファイルをフーリエ級数展開したとき、式(8)を満たす場合のみ、真円度測定が可能となる。この制限より大きい振幅の真円度プロファイルを測定する場合、真円度プロファイルの谷底の部分にレーザビームが接しなくなり、そのような部分の半径が実際より大きく測定される。したがって真円度としてはより小さな値となる。

3.3 合成波真円度プロファイルの測定誤差評価

上記測定限界は単一周波数成分からなる正弦波うねりであることが前提であり、また、真円度プロファイルの頂点及び谷底のみを議論の対象とするものであった。実際の真円度プロファイルは無限の周波数成分を含み、また接線式変位計による真円度測定には必ず測定誤差が含まれており、これらを無視することはできない。

図7に接線式変位計による測定結果シミュレーションのための幾何学的構成を示す。極座標系において、合成波真円度プロファイルを $r(\phi)$ 、また角 θ における合成波真円度プロファイルの接線と回転中心 C との間の距離を $r_m(\phi)$ とす

Fig. 7 Roundness profile with combined undulations

る。 $r(\theta)$ における接線の角度は一般には $\theta \neq \phi$ である。したがって接線、すなわち変位計の測定角が ϕ であるとき、測定される点の角度は θ ではない。両者の差は $r(\theta)$ におけるプロファイルの傾き、すなわち $r(\theta)$ の微分と等しくなる。よって式(9)が成り立つ。

$$\theta - \phi = \tan^{-1}\left(\frac{1}{R} \frac{dr(\theta)}{d\phi}\right) \quad (9)$$

これより $r_m(\phi)$ の値は式(10)で表せる。

$$r_m(\phi) = r_m\left(\theta - \tan^{-1}\left(\frac{1}{R} \frac{dr(\theta)}{d\phi}\right)\right) = r(\theta) \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{1}{R} \frac{dr(\theta)}{d\phi}\right)\right) \quad (10)$$

接線式変位計が角度 ϕ で真円度プロファイルと接する点は $r(\theta)$ であるが、実際にはその余弦が測定される変位となる。

上記の理論により、既知の真円度プロファイルを接線式変位計で測定した際の測定誤差について、式(10)を元に測定結果をシミュレーションした。真円度プロファイルとしては、式(11)に示すような $1 \sim 100$ 山までの周波数成分を重ね合わせたものを使用した。重ね合わせる際の各周波数の位相はランダムに指定し、振幅は式(8)の上限に拡大倍率 k を乗じたものを使用した。

$$r(\theta) = R + k \sum_{n=1}^{100} \frac{W_n}{2} \cos(n\theta + \theta_n) \quad (11)$$

$$W_n = \frac{2R}{1+n^2}, \quad \theta_n = \text{random}$$

図8にシミュレーション結果を示す。実線が合成真円度プロファイル $r(\phi)$ 、一点鎖線がシミュレーションによる測定プロファイル $r_m(\phi)$ である。また、破線が平均円 R である。拡大倍率 k を変化させるとともに、(c)の図についてのみ、各周波数の位相をそろえた。

これらのグラフから最大測定誤差を求めた。その結果、(a)

Fig. 8 Simulation of roundness measurement using tangential type of sensor

図, 拡大倍率 $k=0.5$ のときは約 10%, (b) 図, $k=0.2$ のときは約 2%, (c) 図, $k=0.2$ でかつ位相をそろえたときは約 5%, (d) 図, $k=0.1$ のときは約 0.5% であった。このことから, 拡大倍率 $k \leq 0.2$ であれば, 測定誤差が十分小さくなるということがわかる。ただし, 位相がそろえないなどの悪条件により測定誤差が大きくなる場合があるので注意を要する。直径 30mm, 真円度誤差 $10\mu\text{m}$ の円筒部品を想定した場合, 拡大倍率 $k < 0.1$ に十分収まるため, 接線式変位計による真円度形状測定が実用十分な精度を持つといえる。

4. 仮想Vブロック法の円筒度測定への拡張

仮想Vブロック法による真円度測定では, 円筒部品の回転支持断面と測定断面を分離してもかまわない。そのため, 円筒部品の回転軸方向に測定断面を移動させながら任意の断面で真円度測定を行うことが可能であり, いくつかの測定断面の測定原点からの位置関係が把握できれば円筒度測定にも応用できることになる。

真円度測定部の各変位計の配置が正確に分かっている場合, 真円度測定結果を基にして解析により測定断面と同一平面内にある測定原点から変位計までの距離を求めることができる。図 9 に測定原点と真円度プロファイルの中心の位置関係を示す。ある 2 つの変位計の測定原点からの距離 S_1, S_2 が接線の方程式としてわかっている場合, 真円度形状測定とその後の解析により求めた真円度プロファイルの中心位置 $C(x, y)$ は, 真円度プロファイルの中心を通り, 変位計に平行な 2 本の直線の方程式を連立させて解くことにより次のように求められる。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\frac{\tan A}{\cos B}(s_2(0)-r(B)) - \frac{\tan B}{\cos A}(s_1(0)-r(A))}{\tan A - \tan B} \\ \frac{\frac{s_1(0)-r(A)}{\cos A} - \frac{s_2(0)-r(B)}{\cos B}}{\tan A - \tan B} \end{pmatrix} \quad (13)$$

5. 結 論

本研究は以下のようにまとめられる。

- (1) 従来の固定Vブロック法による真円度測定を, 光学式仮想Vブロック法を適用して, 被測定断面上において完全に非接触な測定に改良した。この改良により, 支持断面以外の断面での真円度測定が可能になるとともに回転誤差を補正することができることを示した。

Fig.9 Measuring origin and roundness profile center on a cross section

- (2) 仮想Vブロック法に用いる接線式変位計について, 真円度形状測定における幾何学的誤差をシミュレーションするための理論を示した。またシミュレーション結果から誤差の値を評価した。
- (3) 仮想Vブロック法を円筒度測定に拡張するための理論式を示した。測定された複数の断面形状の3次元空間における位置関係を知ることにより円筒度測定が可能になることを示した。

本研究は文部省科学研究費補助金・基盤研究(C)(2)(課題番号 10650130)の助成を受けて行われた。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 青木保雄, 大園成夫: 3点法真円度測定法の一展開, 精密機械, 32, 12 (1966) 831.
- 2) 三井公之: 精度診断技術の研究 (3点式主軸回転精度測定装置の開発), 日本機械学会論文集(C), 48, 425 (1982) 115.
- 3) 加藤秀雄, 野村雄二郎, 中野嘉邦: 3点法に基づく机上真円度測定法の改良とn点法への拡張, 精密工学会誌, 56, 12 (1990) 861.
- 4) 高 偉, 野村忠俊, 清野 慧: ソフトウェアデータによる真円度測定に関する研究, 精密工学会誌, 60, 1 (1994) 106.
- 5) 高 偉, 清野 慧: 真円度測定のための直交型混合法に関する研究 (直交型混合法の提案および測定システムの設計), 日本機械学会論文集(C), 61, 589 (1995) 331.
- 6) 中田 孝, 山本 晃: 円筒形工作物の真円度測定法, 日本機械学会誌, 53, 376 (1950) 159.
- 7) 米津 栄: Vブロック式真円度測定法の拡張, 精密機械, 19, 8 (1953) 307.
- 8) 山田隆一, 内田知洋, 柳 和久: 修正Vブロック法による円筒部品の真円度と曲がり量の同時測定システムの開発: 設計工学, 32, 7 (1997) 264.
- 9) 山田隆一, 柳瀬克則, 柳 和久: ガウス型レーザービームの平行走査による透過型エッジ位置検出法, 日本機械学会論文集(C), 57, 533 (1991) 118.