

逐次二点法を用いた超精密真直度測定に関する研究 —補間測定による高精度化の試み—

A Study on Ultra-Precision Straightness Measurements by Sequential Two Points Methods
—A Trial to Make High Accuracy by Interpolating Measurement—

永 田 努*・大 堀 真 敬*・谷 泰 弘**・佐 藤 壽 芳*・鈴 木 和 彦*
Tsutomu NAGATA, Masanori OHORI, Yasuhiro TANI, Hisayoshi SATO and Kazuhiko SUZUKI

1. はじめに

超精密機械加工においてはnm台の表面粗さの創成が要求されている。しかし真直度、平面度等の形状についてnm台の精度を出すことは、その必要性が高まっているにもかかわらず、実現しているとは言い難い。これは、一つには磁気ディスク、シリコン基板等に対して精度よく、かつ安定に測定を行う技術が充分でなかったことよ

つてきている。逐次二点法は真直度の新しい測定法として開発され、基準を要することなく、簡単なアルゴリズムで工作機械と加工物の真直度が同時に繰り返し精度よく測定できる特徴を有しており¹⁾、これまで大型工作機械への適用、普通旋盤におけるレーザ測定法との比較などに試用されてきた^{2,3)}。

表面粗さが10nm前後の鏡面を実現している超精密加工では、平面度など真直度の関わる精度はμm台に止まっていたとみられる。しかし、機器の性能向上に伴い、精度の向上が望まれつつある。

本論文では、逐次二点法を真直度がμm以下となる超精密測定に適用することの可能性を検討し、さらにこの方法の問題点であったセンサ間隔より狭い間隔に対して測定する方法について検討を行ったので報告する。

2. 逐次二点法の原理

逐次二点法の測定原理を図1に示す。送り台にA、B 2個のセンサを平行に固定し、送り台をセンサ間隔ごとに平行移動させると、 A_i 、 B_i 二つのデータ列が得られる。この時、測定面の真直度と送り台の運動真直度はセンサ間隔ごとの離散値として次の式により得られる。

$$\text{測定面真直度} : X_i = X_{i-1} + (A_i - B_i) \quad (1)$$

$$\text{運動真直度} : Y_i = Y_{i-1} + (A_i - B_{i+1}) \quad (2)$$

逐次二点法には送り台が回転する動きをしたときの対処、

*東京大学生産技術研究所 第2部

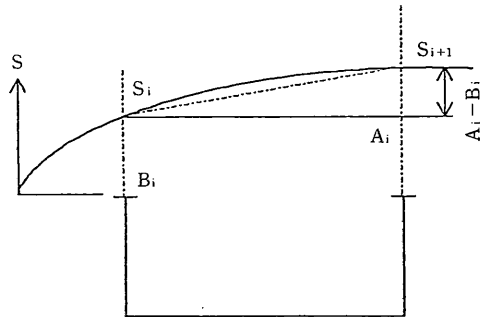
**東京大学生産技術研究所 付属先端素材開発研究センター

高速運動時のデータ処理法等まだ解決されていない問題もあるが、次のような利点がある。

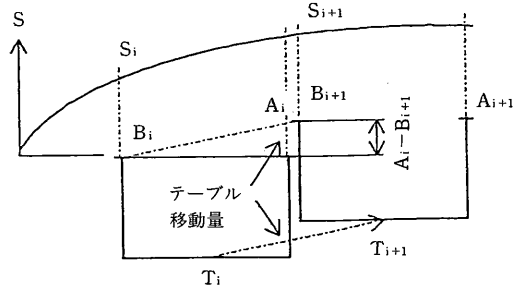
- ・基準試料を必要としない。
- ・センサ間隔の測定を繰り返すことにより、長い範囲の測定を行うことができる。
- ・目的に応じたセンサを選ぶことによって、大型機械の真直度測定や、アルミディスクの真直度の測定などさまざまな対象に適用することができる。

3. 測定値補間の方法

逐次二点法ではその原理からセンサ間隔おきの離散的な測定結果が得られる。一方NC装置では一般にセンサ



(1) 被測定物真直度



(2) テーブル移動真直度

図1 逐次二点法の原理

研究速報

間隔よりも短い間隔の送りが可能であることから、逐次二点法を超精密測定に適用するため本研究では、二点の位置を十分接近して測定できるようにした上、その間隔の間の位置で測定したデータを有効に利用して測定精度を上げる処理方法について検討した。

以下でこの処理方法について説明する。センサ間隔がDの時、センサをD/Nによって移動させるものとする。この結果、N点ごとの測定結果が間隔Dと等しくなるから、N点おきのデータに対して逐次二点法を適用することができる。これにより逐次二点法で処理した真直度離散曲線がN組求められることになる。N組の測定結果は対応する位置関係を適当に合わせることで一本の曲線として求めることができると考えられるが、このためには各組の曲線に対してそれぞれの初期値を決めることが必要である。

センサに静電容量微小変位計ADE 2161 K (ADE社製、最小分解能0.01μm、外径7.1mm、受感部直径1.7mm)をXYテーブル(不二越製、最小分解能0.1μm、移動長150mm)上にセンサ間隔を7.1mmとして取り付け、測定対象面には5インチアルミディスクにアルミ箔を張り付けたものを用いて上述の処理法の検討をした結果について述べる。この際センサの送りピッチはセンサ間隔を71等分することとして0.1mmとした。図2は実験装置の概要であり、図3には以下の説明で用いている両センサの変位測定データを示している。図中横軸の点線の間隔は、センサ間隔と同じとしている。

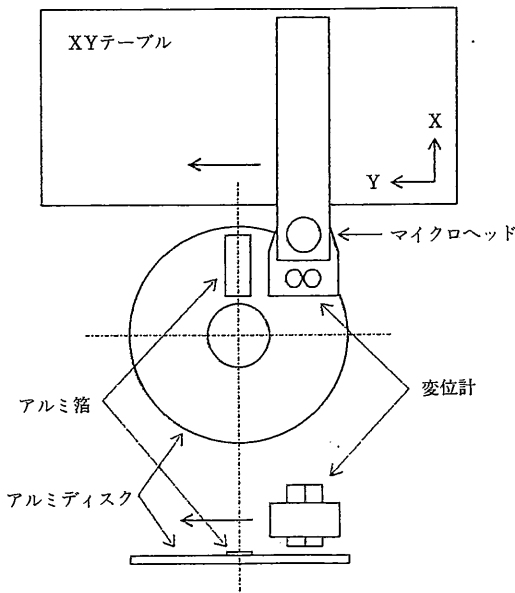


図2 測定装置の概要

3.1 補間法1：線形補間による方法

測定結果を逐次二点法で処理を行うとM点のデータから成る逐次二点法の処理結果がN組得られる。

この処理結果の一本目のデータ列 X_{ij} を用い、各測定点から $i-1$ 点だけ離れている位置の推定値を線形補間により求めることとする。この補間値と、データ列 X_{ij} との誤差の二乗和が最小になるように初期値 I_i を決定するとすれば、 I_i は

$$I_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^{M-1} (\tau X_{ij} + (1-\tau) X_{i,j+1} - X_{ij}) \quad (3)$$

として求められる。ここで $\tau = (i-1)/N$ である。

この方法により処理を行った結果を図4に示す。送り台の真直度は図の縦軸の尺度に対しては十分に真直であることが測定されているが、アルミディスクはその真直度とみられる湾曲した特性にアルミ箔を貼った部分が短形状に測定され、それぞれその特性が分離されている。しかしアルミ箔の部分で急激に変化していることの影響とみられる小さい起伏が測定結果と重なってしまっている。

この方法は最小二乗法を用いているため、この実験における条件のように測定長が短く、Mが小さくなる場合には一部の急激な変化の影響が残り、図4にみる結果となる。しかし、測定長が長く取れる場合には(3)式のMが大きくなることにより平均化の効果が大きくなる結果、上記の影響は小さくなることから有効な方法となる。

3.2 補間法2：形状変化の大きい部分の影響を

除去する方法

線形補間による方法では、センサ間隔に比べて測定長を十分に大きく取れない場合には、形状の変化が大きい部分の影響が測定の結果に誤差として大きく影響する。これに対処するため、変化率の大きい部分のデータを基にデータ列間の関係を求め、上記の影響を抑制することを検討した。

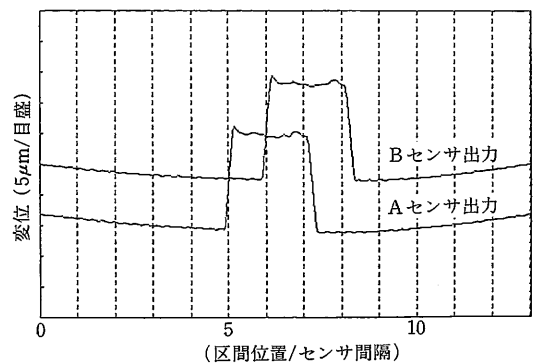


図3 アルミ箔貼付ディスク面測定時の両センサ出力

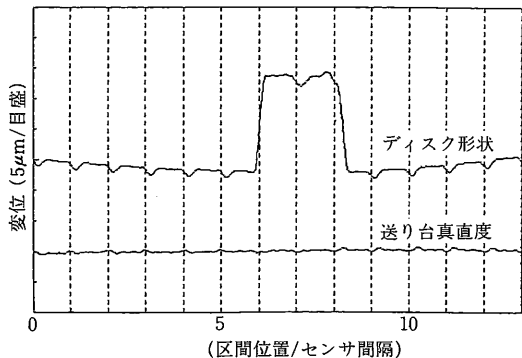


図4 接続法1による処理結果

図5はこの方法を説明する図である。●の点列 X_1 は当初の測定値に対して求められた真直度誤差曲線、□の点列 X_j は当初の二点の間を細かく送って得られるj番目の位置の測定値に対して求められた真直度誤差曲線である。 X_j は X_1 が滑らかな曲線で求められるとすれば、これに重なる曲線として求められるべきものである。しかし、両者の相互の関係を与える条件は与えられておらず、まず X_j の初期値を0として□の点列を求めることとする。ここで区間*i*に注目するとき、 X_j によれば大きく変化して求められる点列が X_1 ではこの変化が求められていない。

以上のように誤差曲線の特性が与えられているときに、 X_1 に対して X_j をもって補間を行う方法について述べる。

図5の下図に示す○の点列は、 X_1 に対しjの位置で直線補間したもので、これを X_{1j} と表すこととする。

まず区間*i*で X_j と X_{1j} をひとしくおき、 $i = 1, 2, \dots, M$ に対して与えられる差の総和を求めることとする。ただしこの時、差の絶対値が最大となるものは除外する。このような処理を*i*の全てについて繰り返し、総和の絶対値が最小となる区間に対し、 X_j 、 X_{1j} を等しくする場合に対して X_j の初期値を設定し、 X_1 に対する補間値とするものとする。この処理は、真直度誤差曲線が大きく変化する部分の影響を極力少なくし、誤差曲線の全体の形状が極力一致する形で行うこととなっている。

この処理方法を用いて求めた結果を図6に示す。図6ではアルミディスク面真直度、送り台真直度の両方にアルミ箔のはってある部分から後の部分で形状の急激な変化の影響が出ている。この理由としてセンサ間隔が想定している値と異なっている可能性があることに着目し、以下の検討を行った。

4. センサ間隔の影響

逐次二点法では送り台の移動の前後で2つのセンサが

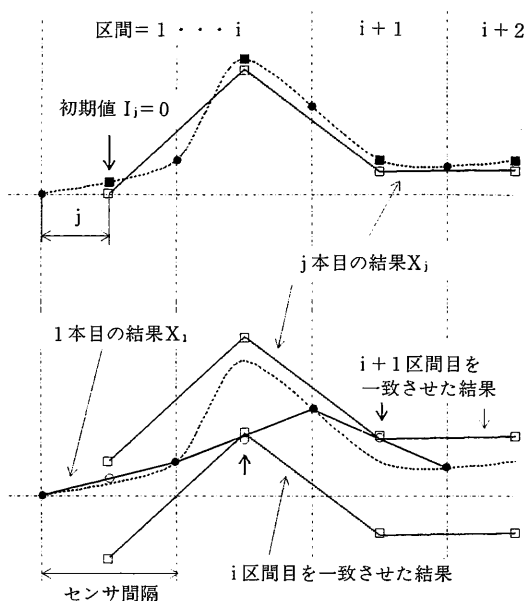


図5 接続法2の説明

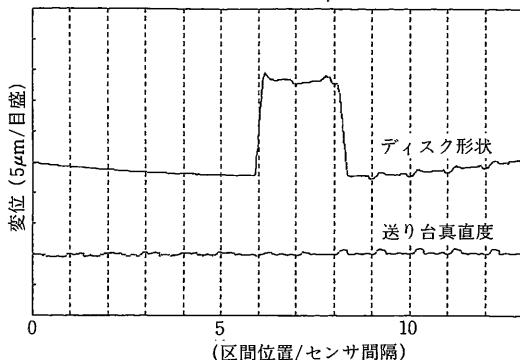


図6 接続法2による処理結果

同一位置で測定できていることが前提条件である。したがって、もし想定したセンサ間の間隔が実際の間隔と異なる時には、同一位置における測定ができていないため誤差が生じている恐れがある。このことは従来の測定結果にも生じてしまっていた可能性があるが、センサの特性が位置の相違に対して感度の幅が十分あったこと、センサ間の距離が大きかったこと等により、誤差量が大きくはならず顕在化していなかったとみられる。

そこで、センサの間隔よりも送りを細かく取って測定を進めたことを利用して、センサの間隔の相違による測定結果への影響を検討した。この測定ではセンサの間隔を最短にするため二つのセンサを密着した構成となっており、間隔はセンサの直径と等しいと考え7.1mmとして

研究速報

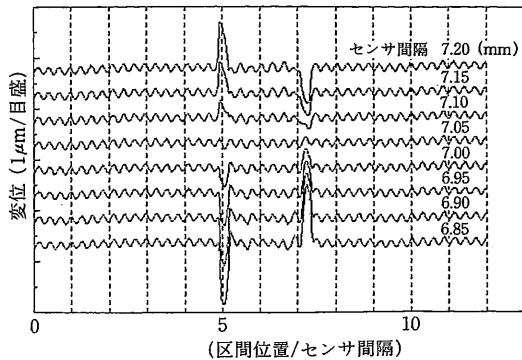


図7 センサ間隔修正に伴うテーブル真直度の変化量

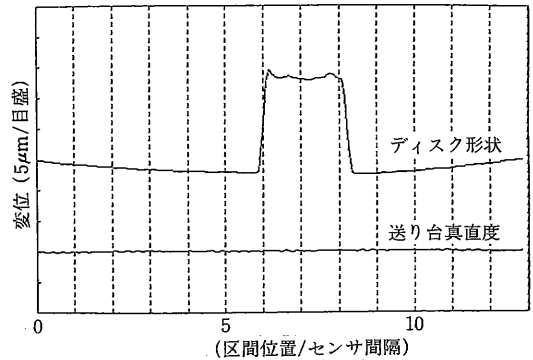


図8 センサ間隔を修正した接続法2による処理結果

処理を行っていた。真のセンサの間隔はいずれにしてもこの近傍とみられるので、測定データ上で間隔を変えることにより、測定にもたらされる影響を調べを試みた。

図7は縦軸に(2)式をもとにしてテーブル真直度の変化量である $A_i - B_{i+N}$ をとり、測定データ上で間隔を変えたときの特性をみたものである。その結果、センサの間隔を7.05mmとした場合アルミ箱の端の部分に相当する位置で他の場合にみられる変化が消えており、センサ間隔と二点の送りを合致させた測定ができています。

また、この図の各特性には周期2mmの正弦波波形が顕著にみられる。この周期はXYテーブルのボールネジの送りと一致しており、予期せずしてこれが検出された結果となっている。

以上の結果にもとづきセンサ間隔を7.05mmとして測定値を直線補間し、補間法2で処理を行った結果を図8に示す。図6と異なり、測定領域の全域でアルミ箱の端部による影響をなくすことができています。

5. ま と め

逐次二点真直度測定法を μm 以下の真直度測定に展開する可能性を検討する中で、形状が急激に変化する試料

を対象として、本来の二点の測定データに基づく真直度推定を行った。これによって逐次二点法について従来は意識されていなかった誤差発生の問題を指摘し、これに対処するために、二点間を埋める測定データを用いて真直度推定の精度を高める補間法の提案を行い、良い結果が求められることを明らかにした。この際、二点間の距離推定の誤差による真直度推定への影響を明らかにした。さらに、安定な高精度測定を行うためには、今回提案した処理法のアルゴリズムの合理化、センサ感度分布の影響の明確化等解決すべき点も少なくなく、これらについては今後の課題である。おわりに、研究の推進に協力を得た栗原貴一君に心から感謝する。(1990年4月6日受理)

参 考 文 献

- 1) 戸沢幸一, 佐藤壽芳, 大堀真敬, 駒崎正洋: 工作機械の真直度と加工精度の関連に関する研究, 機論, 47-419(昭56-7), 909-917
- 2) 田中宏明, 佐藤壽芳, 関口久夫, 大堀真敬: 逐次二点真直度測定法の実用化に関する基礎研究, 機論, 47-423(昭56-11), 1484-1491
- 3) 田中宏明, 佐藤壽芳: 逐次二点真直度測定法の基本的な特性に関する研究, 機論, 48-436(昭57-12), 1930-1937