衛星用大型ミラーの加工機上 高精度形状測定に関する研究(第1報)*

—形状測定システムの構築とアライメント手法の開発—

後藤成晶** 清水裕樹*** 李 貞徹** 伊東 聡*** 高 偉***
足立 茂† 大宮恭平† 佐藤広規† 久田哲弥†† 齋藤佳史†† 久保田浩明†††

On-Machine Profile Measurement of Large Mirror for Satellite (1st Report)
-Construction of the Measurement System and Development of the Alignment Methods-

Shigeaki Goto, Yuki Shimizu, JungChul Lee, So Ito, Wei Gao,
Shigeru Adachi, Kyohei Omiya, Hiroki Sato, Tetsuya Hisada, Yoshifumi Saito and Hiroaki Kubota

This paper presents an on-machine surface profile measurement system for a large mirror to be used on a satellite. The system is constructed by fixing a long-stroke length gauge on a commercial rotary grinder which fabricates the mirror. The combination of the length gauge and the grinder automatically measures the profiles which can be used in compensation of profile error. Position and attitude misalignments of the length gauge induce significant errors to the profile measurement. Quantitative and efficient alignment methods are developed for the position and attitude of the length gauge. The constructed system, the developed alignment methods and profile measurement results are described.

Key words: on-machine measurement, alignment, satellite mirror, profile measurement, rotary grinder

1. 緒 言

近年、人工衛星の観測精度を向上するために、衛星用非球面ミラーの大型化に対する要望が高まっている。従来では衛星用ミラーの素材としてガラスを利用することがほとんどであった。しかし、ガラス製ミラーを大型化する場合、強度を確保するためにミラーを厚く設計する必要があり、重量の問題から大型化が困難であった。そこで、ガラスと同じ光学特性を持ちながら10倍以上の強度を有する炭化ケイ素(SiC)セラミックスが注目を集めている¹⁾²⁾。SiCをミラーの素材に用いることで軽薄構造でも十分な強度が確保でき、衛星用大型ミラーの大型化が容易になると期待されている。

SiC製大型ミラーはロータリ研削盤によって仕上げ加工された後、最終仕上げとして研磨加工が施される。研磨工程には時間を要するため、仕上げ加工の段階で $\pm 5 \mu\text{m}$ の形状精度が要求される。しかし、従来と同じ汎用研削盤や砥石を用いてSiC製ミラーを研削加工する場合、SiCの高強度のため砥石の摩耗が激しく、ミラーに多くの削り残しが発生し、加工精度の保証が困難となる。

加工精度向上の手段として、形状測定結果を反映した再加工、すなわち補正加工が有効である^{3)~5)}。ただし測定のためにワークの取り外し、再取り付けを行うとワークの位置や姿勢がずれてしまい補正加工が困難となるため、加工機上形状測定が必須であり市販三次元測定機などをそのまま利用できない。加工システムに測定用スタイラスや精密位置決めスライドを追加し直径数mmから数十mmの非球面形状測定を行った例⁴⁾⁵⁾があるが、直径1,000mm級のワークを加工可能な大型システムへの応用は技術的、経済的に容易

でなく、有効な形状測定技術が確立されていないのが現状である。

そこで本研究では、衛星搭載用大型ミラーの加工機上高精度形状測定を実現するために、市販の測長器を汎用ロータリ研削盤に取り付けることで構成した機上形状測定システムを提案する。測長器の取り付け位置と姿勢は測定精度に大きな影響を与えるため、正確なアライメントが要求される⁶⁾。本報では、機上形状測定システムの構築、及び測長器の位置と姿勢を高効率にアライメントする手法の開発について報告する。また、開発のシステムを用いた衛星用大型ミラーの形状測定実験結果から、補正加工のための形状測定システムとしての有効性を検証する。

2. 形状測定システム

加工機上形状測定を実現するためには、ロータリ研削盤に三次元測定機のような形状測定システムを付加する必要がある。しかし、既存の加工機へ形状測定専用の精密位置決めスライドを組み込むことは技術的、経済的な障壁が大きい。一方で図1に示すように、タ

Fig.1 Effect of the Z-axis attitude error motion

* 原稿受付 平成23年10月20日

** 学生会員 東北大学大学院(仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)

*** 正会員 東北大学大学院

† 日本ファインセブックス株式会社

†† 宮城県産業技術総合センター

††† 川崎ダイ工業株式会社

Fig.2 The constructed on-machine measurement system

Fig.3 Schematic of the long-stroke length gauge

Fig.4 Size of the satellite mirror

「タッチリガプローブ」⁷⁾を加工機に取り付けるシンプルな構造によっても加工機上形状測定システムが実現可能である。この方法では加工機のXスライド、Zスライドを利用して試料表面の断面形状を記録できるため、計測専用のスライドを付加する必要が無く、実用性が高い。しかし、図1に示したように汎用ロータリ研削盤のZ軸スライドの駆動軸とプローブの測定軸にアップオフセットが存在しているため、Zスライドの姿勢誤差が形状測定精度に強く影響を与える。アップオフセットが約1000 mmである本システムにおいては、例えばZスライドに1秒の姿勢誤差が存在する場合、プローブの位置が高さ方向にずれ、約5 μm の形状測定誤差が発生し、補正加工による形状精度 $\pm 5 \mu\text{m}$ の実現が困難となる。従って、形状測定精度を損なわないために、Zスライドを用いない形状測定システムを構築する必要がある。

図2に本研究で構築した機上形状測定システムを示す。本システムは汎用ロータリ研削盤(岡本工作機械製作所, PRG-12DXNC)の砥石近傍に、長ストローク測長器(Heidenhain, MT-60)を固定することで構成される。長ストローク測長器の構造を図3に示す。この測長器は、先端球の付いたプランジャを伸縮させ、先端球が試料に当たるまでのプランジャの伸び量をスケールから読み取ることで試料面の高度を測定する機器である。この測長器は60 mmの測定ストロークを有しているため、Z軸スライドを使わずに、XZ平面の輪郭を記録できる。X軸スライドによる測定点の位置決めと測長器による試料面高度の測定を繰り返すことで、試料のXZ断面像を離散的

Fig.5 Positioning error induced measurement error

Fig.6 Attitude angle induced measurement error

に記録できる。さらに、スピンドルを回転して複数の断面形状を放射状に集めることで、ミラー全面に渡っての形状評価も可能である。X軸スライドは840 mmの駆動ストロークを持つため、XZ平面の測定レンジは840 $\times$ 60 mmとなる。本研究で実現目標とするミラーの寸法は直径800 mm、起伏約35 mm(図4参照)であり、測定レンジは十分に大きい。また、X軸スライドの位置決め分解能は0.1 μm であり、測長器の測定分解能及び精度はそれぞれ0.1 μm 及び $\pm 0.5 \mu\text{m}$ である。

本システムでは、測長器はPCからの指令信号により動作し、その出力はデジタル信号としてPCへ送信される。ロータリ研削盤も数値制御で自動運転され、それぞれの動作を組み合わせることでミラーの断面形状を自動で測定できる。

本システムの用途は補正加工のための形状測定であり、同一の研削盤を用いて測定と加工を交互に繰り返すことを想定している。測長器を研削盤に固定したまま加工を行うと、機械的な干渉や衝突、さらには高压で吹き付ける切削油や切粉によって測長器が故障する可能性があるため、測定の前後に測長器の脱着を余儀なくされる。したがって、測定の度に測長器の位置と姿勢角は変化してしまう。図4に示す寸法のミラーを測定対象とした条件において、測長器の位置ずれ及び姿勢角が存在している場合に生じる形状測定誤差量を予測したシミュレーション結果を図5及び図6にそれぞれ示す。なお、姿勢角が0 radである状態とは、測長器の測定軸と加工機のZ軸が平行をなす状態を指す。この結果より、測定点の理想点からの位置ずれが5 μm を超えるか、姿勢角が80 μrad 以上存在する場合では、形状測定誤差が1 μm を上回る。測定精度を保証するためには正確かつ定量的なアライメント作業が毎回要求されるが、生産性を損なわないためには、アライメントに割く時間は極力短いことが望ましい。そこで、次章に述べる開発の手法により定量的かつ高効率なアライメントの実現を図る。

3. 位置アライメント

補正加工を行うためには測定座標を加工機座標と対応づける必要がある。そこで測定を行う準備として、測長器の測定点がスピンドル

Fig.7 Measurement procedure of the position

Table 1 Experimental result of position alignment

Number of alignments	Experiment 1 (X_p, Y_p)	Experiment 2 (X_p, Y_p)
	μm	μm
0	(40.6, -68.7)	(64.9, 396.3)
1	(0.8, -1.9)	(-5.2, 0.7)
2	(-0.4, 0.4)	(0.5, 0.6)

ルの回転中心と一致するよう位置アライメントを施した後、そこを原点とした座標を用いて形状測定を行う。この位置アライメントの誤差が位置ずれの原因となるため、正確に行う必要がある。

図7に位置アライメントのためのセットアップ及び手順の模式図を示す。測定対象のミラー中央には穴があり、そこにベアリング鋼球を設置する。鋼球は位置調整用のXY手動ステージに搭載し、XY手動ステージはスピンドルに磁力で固定する。以下に、この鋼球を用いたアライメント手法の手順を述べる。

鋼球をスピンドル上に置き、鋼球をスピンドル回転軸に変位センサなどを用いて芯出しする(Step 1)。その上空へ測長器を移動させ、伸ばしたプランジャと鋼球との接触点の高度 H_i を測定する(Step 2)。このとき、 H_i は式(1)を満たす。

$$R^2 = X_p^2 + Y_p^2 + (H_i - h)^2 \quad (1)$$

ただし、 R は鋼球と先端球の半径の和、 (X_p, Y_p) はスピンドル回転中心を原点とした測長器先端球球心のXY座標、 h は鋼球球心のZ座標値である。次に、手動ステージを用いて鋼球をX方向に d だけシフトさせる(Step 3)と、接触点の高度 H_0 は式(2)を満たす。

$$R^2 = (X_p - d)^2 + Y_p^2 + (H_0 - h)^2 \quad (2)$$

次にスピンドルを90度ずつ回転させると、各回転角 θ において、測定値 H_θ の満たす関係式は以下ようになる(Step 4)。

$$R^2 = X_p^2 + (Y_p - d)^2 + (H_{90} - h)^2 \quad (3)$$

$$R^2 = (X_p + d)^2 + Y_p^2 + (H_{180} - h)^2 \quad (4)$$

$$R^2 = X_p^2 + (Y_p + d)^2 + (H_{270} - h)^2 \quad (5)$$

式(1)～(5)を連立させることで、式(6)～(8)が得られる。

$$X_p = \frac{1}{4d} \{H_0^2 - H_{180}^2 - 2(H_0 - H_{180}) \cdot h\} \quad (6)$$

Fig.8 Measurement procedure of the attitude angle

Table 2 Experimental result of attitude angle measurement

Run number	θ_s , mrad	θ_f , mrad
1 st	2.404	13.279
2 nd	2.402	13.281
3 rd	2.401	13.283

$$Y_p = \frac{1}{4d} \{H_{90}^2 - H_{270}^2 - 2(H_{90} - H_{270}) \cdot h\} \quad (7)$$

$$h = \frac{2H_i^2 - H_0^2 - H_{180}^2 - 2d^2}{4(2H_i - H_0 - H_{180})} + \frac{2H_i^2 - H_{90}^2 - H_{270}^2 - 2d^2}{4(2H_i - H_{90} - H_{270})} \quad (8)$$

以上により算出された座標をもとに、アライメント用手動Yステージ及びX軸リニアスライドを用いて、測長器を原点へ移動させることで、位置アライメントを行う。式(6)～(8)で算出した座標値 (X_p, Y_p) には、Step 1における鋼球の芯出し等の幾何的原因の誤差が数%含まれる。しかし、さらにアライメントと座標値 (X_p, Y_p) の測定を繰り返すことで、幾何的原因の影響を無限小へと収束し、最終的なアライメント誤差をStep 1における鋼球の芯出し精度によらず、測長器やアライメントステージの精度による限界まで縮小できる。なお、鋼球球心のZ座標値 h は作業中変化しないことから、二回目以降の作業ではStep 1～3を省略してよい。

表1に位置アライメントの実施結果例を示す。実験を二度行い、それぞれの結果を示しているが、いずれもアライメント前は100 μm 程度であった位置ずれが、1度目のアライメントによって数 μm 程度まで縮小し、さらに2度目のアライメントによって、アライメント用手動Yステージや測長器の限界である $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 程度まで縮小した。このように、位置ずれを定量的に算出することで、的確なアライメントが2軸同時に達成できる。なお、セッティングを含めた位置アライメント作業時間は20分程度と短時間である。

4. 姿勢角補正

4.1 姿勢角測定

本報では変位センサの測定軸と加工機のZ軸がなす角を姿勢角と呼ぶ。作業性やシステム全体の安定性を考慮し、ゴニオステージ

やスパーサによる測長器姿勢の機械的アライメントに替えて、姿勢角を定量的に測定し演算で形状測定データを補正した。

まず、姿勢角の測定方法を述べる。図8に姿勢角測定のためのセットアップ及び手順の模式図を示す。補助センサとして接触式変位センサ (Keyence, AT2-52) を導入し、ミラー中央の穴に設置する。変位センサをプランジヤ側面に当て、その接触点の測定軸上座標を z' と置く。まず、プランジヤを縮めた状態で、プランジヤ先端近傍に変位センサを当てる (Step A)。この接触点を $z' = a$ とすると、変位計の出力 M_1 は

$$M_1 = f(a) + b \quad (9)$$

となる。ただし、 $f(z')$ は一次成分を含むプランジヤ側面の形状、 b は出力のオフセットである。次に、プランジヤを伸ばすと変位センサの接触点がプランジヤ上で推移する (Step B)。このときのプランジヤ伸び量を E とすると、その出力 M_2 は

$$M_2 = f(a + E) + b \quad (10)$$

となる。更に、リニアスライドにより測長器を Z 軸方向に移動すると、接触点の推移に加えて姿勢角 θ の正接成分が出力変化として現れる。測長器の Z 軸方向移動距離が dz の際に得られる出力 M_3 は

$$M_3 = f(a + E - dz/\cos(\theta)) + b + dz \tan(\theta) \quad (11)$$

となる。ここで、プランジヤ上の接触点が M_1 を取得した時に接触していた点と一致するように Z スライドの移動量 dz を調節すると (Step C)、そのときの出力 M_4 は

$$\begin{aligned} M_4 &= f(a + E - E \cos(\theta)/\cos(\theta)) + b + E \cos(\theta) \tan(\theta) \\ &= f(a) + E \sin(\theta) + b \end{aligned} \quad (12)$$

となる。式(9)及び(12)から式(13)が得られ、姿勢角 θ が算出される。

$$\frac{M_4 - M_1}{dz} = \frac{f(a) + E \sin(\theta) + b - f(a) - b}{E \cos(\theta)} = \tan(\theta) \quad (13)$$

以上の Step A ~ C を、例えば X 軸回りについて実施した場合、スピンドルを90度回転することで、 Y 軸回りについてのセッティング作業を省略できる。以上の姿勢測定はセッティング及び2軸方向測定を含めて15分以内で実施できる。表2に姿勢角測定の結果を示す。 θ_x , θ_y ともに mrad オーダの姿勢角を μrad オーダの繰返し性で測定できた。

Step C における接触点の調整は、プランジヤ側面の形状を、プランジヤ側面と Z 軸のなす角を含めて式(13)にてキャンセルするために行っている。本研究で実際に用いたプランジヤ側面は形状がほぼ直線でありその影響は無視できるものの、測定軸に対して 0.4 mrad 程度の傾きをもつことが実験で確認されている。この傾きは無視できない量であり、ステップ C での調整が必要である。一方、Step C における接触点調整と Step A での測定点調整との間にズレが生じた場合には姿勢角測定誤差が生じる恐れがあるが、その影響は軽微である。例えば dz を 50 mm とし、Step A 及び C の測定点調整ズレを $\pm 1 \text{ mm}$ 程度とすれば、姿勢角測定誤差は $\pm 8 \mu\text{rad}$ 程度である。これによる形状測定誤差への影響は $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 程度と小さく、またこの調整は目視で十分達成可能である。

4.2 姿勢角を考慮した補正演算

姿勢角によって生じる X 軸方向の測定点ずれを図9に示す。測定点は、プランジヤの伸び量が位置アライメントを行ったとき、すなわち測長器の出力が $H_0 \sim H_{270}$ と一致する場合のみ正しく、それ以外では伸び量に応じてずれる。 Y 軸方向も同様である。このことを考慮し、以下に補正方法について述べる。

変位センサの姿勢角が X 軸回りに θ_x , Y 軸回りに θ_y であるとする。プランジヤの伸び量を E , それを XZ 平面に投影したものを E_x , YZ

Fig.9 Attitude angle induced positioning error

Fig.10 Projection of plunger elongation

平面に投影したものを E_y とすると、図10に示すように、

$$E_x = E \cos \theta_y \sqrt{1/(1 - \sin^2 \theta_x \cdot \sin^2 \theta_y)} \quad (14)$$

$$E_y = E \cos \theta_x \sqrt{1/(1 - \sin^2 \theta_x \cdot \sin^2 \theta_y)} \quad (15)$$

となる。よって、 n 番目の測定点を (x_n, y_n, z_n) としたとき、姿勢を考慮した正しい測定点 (x'_n, y'_n, z'_n) は、位置アライメントを行ったときのプランジヤの伸び量を E_c として次のように求められる。

$$\begin{aligned} x'_n &= x_n + (E_{xn} - E_c) \cdot \sin \theta_x \\ &= x_n + (E_n - E_c) \cdot \cos \theta_y \cdot \sin \theta_x \sqrt{1/(1 - \sin^2 \theta_x \cdot \sin^2 \theta_y)} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} y'_n &= (E_{yn} - E_c) \cdot \sin \theta_y \\ &= (E_n - E_c) \cdot \cos \theta_x \cdot \sin \theta_y \sqrt{1/(1 - \sin^2 \theta_x \cdot \sin^2 \theta_y)} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} z'_n &= -E_{zn} \cdot \cos \theta_x \\ &= -E_n \cdot \cos \theta_y \cdot \cos \theta_x \sqrt{1/(1 - \sin^2 \theta_x \cdot \sin^2 \theta_y)} \end{aligned} \quad (18)$$

測定された姿勢角をもとに式(16) ~ (18)を用いて形状測定データを修正すると、姿勢角の影響を取り除いた形状測定結果が得られる。

5. 形状測定実験

開発したシステムを用いて、衛星用大型ミラーの加工機上形状測定実験を行った。本実験では、形状測定サンプルとして、汎用ロータリ研削盤で従来通りに加工された球面ミラーを利用した。すなわち、補正加工時の形状測定と同じ条件である。球面ミラーの直径は 800 mm 、曲率半径は約 $2,000 \text{ mm}$ である。ロータリ研削盤で加工されるミラーは軸対称形状に仕上がるため、補正加工には半径分の断面測定で十分である。ミラーの半径は 400 mm であり、また中央に半径 125 mm の穴があるため、半径位置 125 mm から 400 mm に渡って 5 mm 間隔で離散的に形状測定を行った。測定に要した時間は約 400 秒である。

図11に、本システムを用いて測定した大型ミラーの形状を示す。半径 400 mm 、起伏およそ 35 mm のミラー形状をレンジオーバーすることなく取得できている。また、5回繰返し形状測定したときの各

Fig.11 On-machine profile measurement result

Fig.12 Fabrication error

点における測定値について標準偏差を算出し、図 11 中に表示した。標準偏差はミラーの全域に渡っておよそ $0.3 \mu\text{m}$ を下回っていることが分かる。また、図 11 の形状測定結果からミラーの設計形状を差し引いて得られたミラーの加工誤差を図 12 に示す。ミラーの加工誤差は外周へ行くに従い正方向に増加する傾向が見られる。図中、加工誤差が正方向に大きいことは削り残しが多いことを意味するが、この結果は、半径位置に比例して研削量が増加するため砥石が摩耗されやすくなることと一貫性がある。このように、開発した加工機上形状測定システムを用いることで、削り残しの可視化及び補正加工への応用が可能になる。

開発したアライメント手法の有効性を検証するため、再現性の評価を行った。まず、開発されたシステムを用いてミラーの形状測定を行った。その後、測長器を加工機から取り外し、そのまま一度加工機へ取り付け付けた。その際に取り付け誤差が生じるため、位置アライメントや姿勢角測定を行い、再びミラー形状を測定した。1 度目の形状測定結果と 2 度目の形状測定結果を比較することで、開発の形状測定システムの再現性を評価した。ただし、それらの形状測定結果の高周波成分は表面粗さに由来するため、周期 50 mm 以下の成分をフィルタで除去してから再現誤差の値を計算した。

図 13 に実験結果を示す。今回、姿勢角補正はプログラムにより行ったが、その有効性を検証するために、姿勢角補正の有無による差を比較した。図 13(a)に位置アライメントのみを施し姿勢角補正を行わなかった場合の結果を、図 13(b)に位置アライメントと姿勢角補正の両方を行った場合の結果を示す。図 13(a)では、外周へ進むに従って 1 度目と 2 度目の実験結果に差が発生し、最大で $20 \mu\text{m}$ の再現誤差が発生した。一方、図 13(b)では再現誤差が $2 \mu\text{m}$ まで低減した。以上の結果から、位置アライメントと姿勢角補正の両者の適用で、 $\pm 1 \mu\text{m}$ の再現性を得られることが示された。

(a) Without attitude angle compensation

(b) With attitude angle compensation

Fig.13 Reproducibility

6. 結 言

長ストローク測長器を研削盤に導入し、X 方向 840 mm 、Z 方向 60 mm の測定レンジを有する加工機上形状測定システムを構築した。提案の手法を用い、作業時間合計 30 分程度で X、Y 軸方向及び X、Y 軸回りの合計 4 自由度に関するアライメントが達成できることを示した。また、半径 400 mm 、起伏およそ 35 mm のミラー形状を測定し、最大で $90 \mu\text{m}$ の加工誤差を確認した。更に、本システムによる形状測定は $\pm 1 \mu\text{m}$ の再現性を有することを実験で示した。本システムを用いて、大型ミラーの補正加工実験を行う予定である。

謝 辞

本研究は平成 21 年度補正予算事業 戦略的基盤技術高度化支援事業によるものである。なお、実験では東北大学 武藤啓志氏、細野幸治氏より協力を得たことを記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Yumin Zhang, et al.: Large-scale fabrication of lightweight Si/SiC ceramic composite optical mirror, Mater. Lett., 58 (2004) 1204.
- 2) Takashi Onaka, Takao Nakagawa: SPICA: A 3.5 m space infrared telescope for mid- and far-infrared astronomy, Adv. Space Res. 36 (2005) 1123.
- 3) J. Mou, C. Richard Liu: A method for enhancing the accuracy of CNC machine tools for on-machine inspection, J. Manuf. Sys., 11, 4 (1992) 229.
- 4) F.J. Chen, et al.: Profile error compensation in ultra-precision grinding of aspheric surfaces with on-machine measurement, Int. J. Mach. Tools Manuf., 50 (2010) 480.
- 5) M. Sazedur Rahman, et al.: Development of an on-machine profile measurement system in ELID grinding for machining aspheric surface with software compensation, Int. J. Mach. Tools Manuf., 48 (2008) 887-895.
- 6) Wei Gao, et al.: Surface profile measurement of a sinusoidal grid using an atomic force microscope on a diamond turning machine, Prec. Eng., 31 (2007) 304.
- 7) 武部 隆: 工作機械用タッチプローブの計測技術, 精密工学会誌, 75, 11 (2009) 1273.