

# 非接触法による3次元形状高精度測定技術の開発\*

和合 健\*\*、米倉 勇雄\*\*

非接触式座標測定機の性能評価を行うためにボールディメンジョンゲージ (BDG) と呼ぶ検査用標準器を提案した。測定球の表面処理の違いによる光学特性と座標測定の不確かさの関係を調べるために、二つの実験を行った。その結果、表面散乱に起因して生じる座標測定の不確かさの傾向は、反射光分布による曲げ角度  $\alpha_{agl}$ °と最大曲げ角度  $\beta_{agl}$ °及び双方向反射率分布関数(BRDF)を指標として分類できることを示した。

キーワード：非接触式座標測定機、ボールディメンジョンゲージ、不確かさ、光学特性、表面散乱、曲げ角度、BRDF

## Development of High Accuracy Measurement Method for 3 Dimension Feature by Non-contact type CMM

WAGO Takeshi and YONEKURA Isao

A new artifact, Ball Dimension Gauge (BDG), was proposed to evaluate the performance of non-contact probe coordinate measuring machines (CMM). The relationship between optical characteristics of measuring spheres surfaces and uncertainty of coordinate measuring was demonstrated by results of two experiments. The results showed that the tendency of uncertainty of coordinate measuring, which might be caused by surface scattering of measuring spheres, was able to be classified by use of a bend angle of  $\alpha_{agl}$ , maximum bend angle  $\beta_{agl}$  and bi-directional reflectance distribution function (BRDF).

key words : non-contact type CMMs, ball dimension gauge (BDG), uncertainty, optical surface characteristics, surface scattering, bend angle, BRDF

### 1 緒言

ステレオ画像式やレーザ変位プローブ式などによる非接触座標測定は高速に面情報が取得できる反面、試料表面の性状や光学的特性の影響により測定の不確かさが増大する可能性がある。この分野は公的規格整備が未だ確立されていない現状において使用者独自の不確かさの評価方法<sup>1)</sup>が求められている。本研究では、非接触座標測定機(以下、非接触CMMという)に適応するアーティファクトを設計製作し、ライン型レーザ変位プローブCMMを使用してアーティファクトの性能試験を行い、非接触CMM用検査用標準器の測定球に要求される光学特性及び光学特性の評価方法を明らかにする。

### 2 BDGの性能試験

#### 2-1 評価の基本定義

図1に示すボールディメンジョンゲージ(BDG)<sup>2)</sup>を使用して球の表面処理に起因する座標測定の不確かさを求めた。評価指標はJIS Z 9090:1991に基づき、式(1)に示す

比例回帰式を基本機能として式(2)に示す測定のSN比を用いた。

$$y = \beta M \quad (1)$$

$$\eta = \beta^2 / \sigma^2 \quad (2)$$

ただし、 $y$ は非接触CMMによる測定値であり、JIS規格で規定する20°Cからの温度の偏りを取り除いた値、 $M$ はBDGの表示値、 $\beta$ は回帰係数、 $\eta$ は測定のSN比(db)、 $\sigma^2$ は誤差成分の大きさ、 $\beta^2$ は信号の効果の大きさである。

#### 2-2 因子と水準

信号因子  $M$  は式(1)の測定値  $y$  を変化させる原因系となる因子であり、図1に示すBDGの球1、球2、球3による球間距離とした。球間距離は球2~球3間を  $M_1$ 、球1~球2間を  $M_2$ 、球1~球3間を  $M_3$  の3水準とした。制御因子は高いSN比を得るために能動的に機能操作する因子であり、D: 測定球の表面処理の4水準(Cr、Ni、GIP-T、Wp)とし、Crは硬質クロム鍍金、Niは無電解ニッケル鍍金、GIP-Tはイオンプレーティング処理、

\* 地域新生コンソーシアム研究開発事業「次世代情報家電・自動車用高度部材の生産技術の開発」

\*\* 電子機械技術部

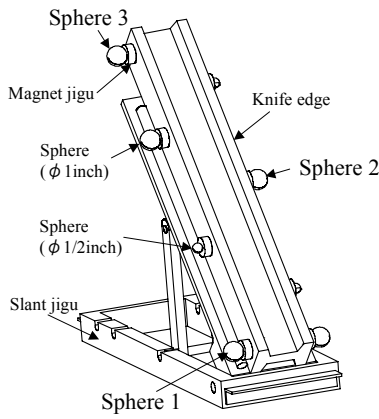


図1 ボールディメンジョンゲージ (BDG)

表1 直交表への割り付け

No.	Control Factor	Indicative Factor													
		A <sub>1</sub>					A <sub>2</sub>			A <sub>3</sub>		A <sub>4</sub>			
		B <sub>1</sub>		B <sub>2</sub>			B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>			
1	Cr	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	·	·	·						
2	Ni	η													
3	GIP-S	·													
4	Wp	·													

η: SN ratio of measurement (db)

Wp(White-powder)は白色粉体塗布である。標示因子は使用条件や試験条件の測定誤差への影響の程度を調べるために設定する因子であり、A: BDG の位置の 4 水準 (90°, 180°, 225°, 135°), B: 走査面数の 2 水準 (1 走査面、3 走査面)、C: 測定の繰り返しの 5 水準 (1 回目~5 回目)とした。以上の因子を表 1 に示す直交表に割り付け、三角測量式のライン型レーザ変位プローブを持つ非接触 CMM(ミツトヨ製 CRT-AC776- LC15)を使用して座標測定を行った。

### 2-3 実験結果及び考察

特性値を球間距離として測定の SN 比を算出し、制御因子 4 水準毎の要因効果図として図 2 に示す。図中には走査面数毎の誤差限界(95%信頼限界)の平均値を示す。測定の SN 比は因子の水準間の差が 3db 以上で有意と判定し、測定の SN 比が大きい条件でばらつきと偏りが小さく良好な測定が行われていると判定する。図 2 から、Cr と Ni は 3 走査面での SN 比の平均値が Cr で 48.0db(誤差分散  $7.64 \times 10^{-5} \text{mm}^2$ )、Ni で 44.0db(誤差分散  $7.90 \times 10^{-5} \text{mm}^2$ )となり、SN 比の高い良好な測定を可能にするが、1 走査面において SN 比が低いことがわかる。一方、GIP-T は 3 走査面での SN 比が 35.3db(誤差分散  $2.66 \times 10^{-3} \text{mm}^2$ )、1 走査面では 36.7db(誤差分散  $1.77 \times 10^{-3} \text{mm}^2$ )となり、GIP-T と Wp は 1 走査面と 3 走査面の SN 比の差が小さい。

## 3 球の光学的特性の検証

### 3-1 表面散乱の測定

非接触 CMM に適した球表面の光学的特性を三次元変角光度計(村上色彩技術研究所製 GP-200)を使用して求め

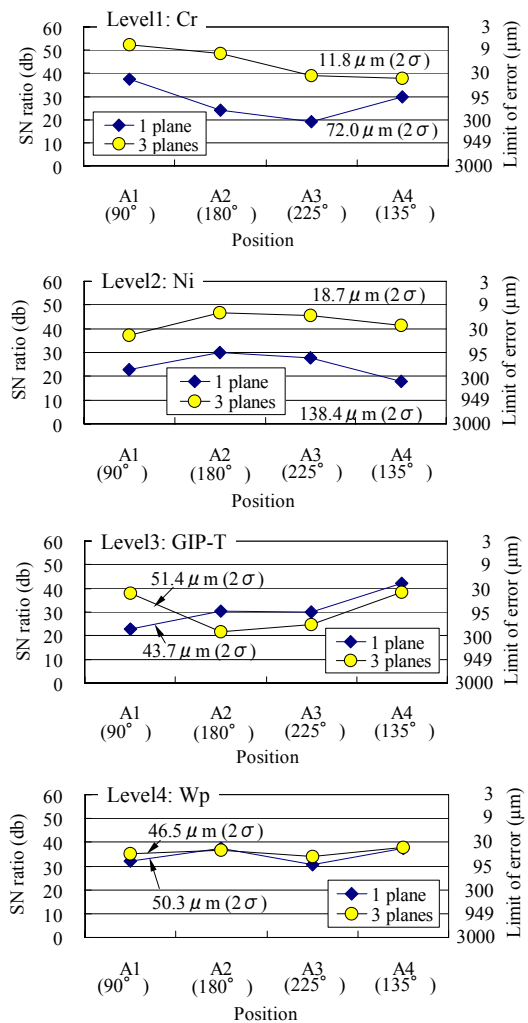


図2 制御因子 D 毎の SN 比の要因効果図

た。各表面処理の反射光分布は尖頭利得補正により二次元反射強度を 100%に校正して測定した。反射光分布の測定は、照射角度  $\theta_i$  が  $-45^\circ$  方向から光を照射し  $0.1^\circ$  ピッチで XZ 面を  $-90^\circ \sim 90^\circ$  の範囲で受光器を走査する方法で行った。なお、球表面を再現するため、試料を YZ 面で  $2.0^\circ$  傾けて設置し、拡散反射成分を表す式 (3)の曲げ角度  $\alpha_{agl}^\circ$  と式(4)の最大曲げ角度  $\beta_{agl}^\circ$  を指標として各試料の表面散乱を評価した<sup>3)</sup>。

$$\alpha_{agl} = a/2 \tag{3}$$

$$\beta_{agl} = b/2 \tag{4}$$

ただし、 $a$  は各試料の尖頭利得  $G_0$  をすべて 100%に校正した時の尖頭利得の 50%値( $G_0/2$ )の分布の全幅、 $b$  は尖頭利得の 33%値( $G_0/3$ )の分布の全幅である。表 1 に  $\alpha_{agl}$  と  $\beta_{agl}$  を図 3 に表面散乱の結果を示す。表 2 と図 3 から、Cr と Ni の  $\alpha_{agl}$  と  $\beta_{agl}$  が小さいことがわかる。したがって、図 2 との比較から、指向性が高い(表面散乱が小さい)反射光分布は 1 回の走査での測定面積が小さいが、高い正確さで座標測定を行うので、走査面数を増やすことで高い SN 比(ばらつきの小さい)の測定ができると考えられる。しかし、走査面数が少ない場合は部分円測定による誤差の影響から SN 比が低くなる。一方、Wp と

表2 表面散乱特性

No.	D: Surface treatment	(Unit: degree)	
		$\alpha$ : Bend Angle	$\beta$ : Maximum Bend Angle
1	Sp	2.5	3.5
2	Cr	4.4	7.4
3	Ni	6.5	9.9
4	GIP-T	14.8	20.6
5	Wp	59.9	69.8

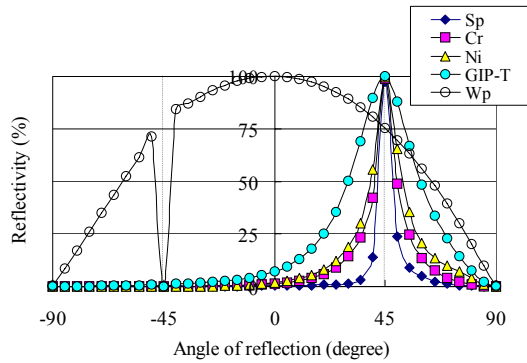


図3 直交座標系で表示した表面散乱

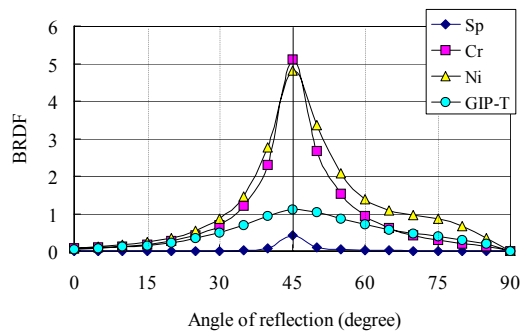


図4 BRDFの分布

GIP-Tは $\alpha_{agl}$ と $\beta_{agl}$ が大きい。したがって、表面散乱が大きい反射光分布は1回の走査あたりの測定面積が十分に広いため、走査面数に依存しない測定が可能と考えられる。しかし、広範囲にわたる散乱光による測定のため座標測定における正確さが低くなり低いSN比(ばらつきが大きい)となる。

### 3-2 BRDFによる光学的特性の評価

双方向反射率分布関数(bi-directional reflectance distribution function)BRDFは総合的に物体表面における光の反射を記述する手段であり、ASTM E2387-05<sup>4)</sup>で規定されている。本研究では、式(5)、式(6)によりBRDFを算出した<sup>3)</sup>。

$$BRDF = R / \pi \quad (5)$$

$$R = (r_0/R_0) \times R_w \sim (r_i/R_i) \times R_w \quad (6)$$

ただし、 $R_w$ は常用標準白色面の立体角反射率、 $r_0 \sim r_i$ は

任意角度*i*における試料が参考白色面に対する相対立体角反射率、 $R_0 \sim R_i$ は任意角度*i*における常用標準白色面が参考白色面に対する相対立体角反射率である。また、3-1の表面散乱の測定から標準的な校正球にも使用されているWpの表面性状は $-90^\circ \sim 90^\circ$ の広角にわたる散乱光を発生し非接触CMMに適する表面処理であることが示された。そこでWpを常用標準白色面として、Sp(Specular:鏡面)、Cr、Ni、GIP-Tの4種類の試料についてBRDFを算出した。なお、BRDFの単位は無次元であり、値は因子D:表面処理の水準間の相対値である。また、BRDFには物体表面の拡散反射成分と正反射成分の合成された成分が分布として現れることになる。

### 3-3 BRDFによる結果及び考察

BRDFの結果を図4に示す。図4から、GIP-Tは正反射成分がCrとNiに比べて少ないためBRDFが小さく、CrとNiは拡散反射成分が少ないBRDFとなるが、尖頭利得が他の試料よりも十分高い(正反射成分が多い)効果からBRDFは大きいことがわかる。この結果、CrとNiが示すBRDFと図2に示すSN比から、非接触プローブに適する表面は拡散反射成分と正反射成分を同時に発生する光学特性を持つ表面であると考えられる。

## 4 まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 非接触式座標測定機に適する測定球表面は、拡散反射成分と正反射成分を同時に発生する光学特性を有する表面と考えられる。
- (2) 座標測定の不確かさの大きさは測定球表面で異なり、大別すると拡散反射成分の多い測定球表面では点群のばらつき( $\sigma$ )、正反射成分の多い測定球表面では部分円による曲率半径の推定誤差が影響する。
- (3) (2)で示した座標測定の不確かさの傾向は、測定球表面の拡散反射成分と正反射成分を表す曲げ角度 $\alpha_{agl}$ と最大曲げ角度 $\beta_{agl}$ 及びBRDFを指標として分類することができる。

### 参考文献

- 1) JIS B 7440-2 (製品の幾何特性仕様(GPS)-座標測定機(CMM)の受入検査及び定期検査-第2部:寸法測定)、日本規格協会、(2003)
- 2) 和合健、米倉勇雄:非接触法による3次元形状高精度測定技術の開発、岩手県工業技術センター研究報告第14号、(2007)
- 3) 近藤暁弘:光散乱性板の光学的特性、(株)村上色彩技術研究所
- 4) ASTM E2387-05 Standard Practice for Goniometric Optical Scatter Measurements, ASTM, (2005)