

ボールアーティファクトによる 歯形計測の校正と不確かさ

Calibration of Tooth Profile Measurement and Uncertainty Analysis Based on Ball Artifact Method

梅 津 健 太*
Kenta UMETSU

石 戸 亘**
Wataru ISHIDO

藤 原 欣 哉*
Kinya FUJIWARA

要 旨

長さの国家標準器に対してトレーサブルであるボールアーティファクトにより歯形計測の校正をおこない、校正結果から任意諸元の歯形と1対1に対応して歯形計測の不確かさを定量化する評価技術を確立した。

本評価技術では測定機の校正作業を最小限とし、歯形計測における統計的性質を代数的にモデル化し、歯形計測を数値演算によりシミュレート可能としたことで歯形計測の信頼性を統計的に評価している。本評価技術により製造現場の歯形検査において、実用性の高い検査精度の保証を可能とした。

ABSTRACT

Tooth profile measurements were calibrated using a double ball artifact that is traceable to a national standard of length. From the calibrated results, an evaluation technology that quantifies the uncertainty of tooth profile measurement in a 1-to-1 correspondence with a tooth profile of arbitrary specifications was established. In this evaluation technology, the work of calibrating the measuring machine has been minimized, and measurement simulations have been made feasible by modeling the statistical properties, as well as algebraic calculation from the model during tooth profile measurement, enabling the reliability of tooth profile measurement to be statistically evaluated. As a result, during tooth profile inspections on the manufacturing floor, practical inspection accuracy is now guaranteed.

1. 緒言

歯車に付随する静粛性をはじめとした機能の多くは、3次元的な曲面形状の精度に依存する。

例えば静粛な運転を満足するための歯形精度は $1\mu\text{m}$ 程度との報告⁽¹⁾があり、歯車製造精度に対する高度化が進んでいる。歯車精度の測定・検査には歯車測定機が広く採用されているが、歯車精度の高度化に対応するためには高精度な測定技術と測定精度の妥当性、信頼性を評価する校正技術の高度化が求められている。歯車の精度規格ISO 1328-1, JIS B 1702-1 において例えば最高等級0級では $1\mu\text{m}$ が要求される。

従来、歯車測定機の校正には高精度に加工、値付けされた歯車を校正用標準(以下アーティファクトと呼ぶ)としていた。しかし歯車をアーティファクトとして採用し、その標

準としての高精度化を目指す場合、現状では以下の課題がある。

- (1) 歯車加工精度の高度化に限界がある。
- (2) 歯車を高精度に計測し保証する手段が存在しない。

また歯車をアーティファクトに採用した場合、単一諸元の歯車で構成されたアーティファクトでは、検査対象となる無数の諸元の歯車を包含して精度保証をおこなえる厳密な妥当性に乏しい。よって製造現場の検査において歯車精度の高度化に対応でき、検査精度を実用的に保証する方法の確立が難しくなっている。この現状から、近年 ISO/TR 100645 においてボールアーティファクト(Double Ball Artifact: DBA)を用いた歯形計測の校正法が提案されている。ボールアーティファクト法は、高い真球度と高精度な表面性状を有する鋼球を、擬似的にインポリュート歯形とみなした測定をおこない、計測結果と理想的な歯形形状の偏差を定量化する。ここ

* 四輪開発センター

** (株)フォーラムエンジニアリング

Table 1 Specification of DBA

Name	Material	Thermal expansion coefficient [$1/K$]	Size [mm]
Base plate	Clearceram-Z	0.8×10^{-7}	$\phi 130$
Steel ball	Bearing steel	11.6×10^{-6}	S $\phi 25.4$

ではその編差を歯形計測誤差と定義する。

本稿で報告する校正手法はDBAの従来の目的に加え、校正データから歯車測定機の運動機構である案内軸や回転テーブルの位置決めといった複数の運動誤差を定量化し、運動誤差の歯形計測誤差に対する寄与を既知とすることを旨とした。それは機構の運動誤差は系統的な繰り返しがあり、系統誤差を数値補正することで歯形計測誤差の精度向上が期待できるためである。さらに校正により定量化された歯形計測誤差を参照し、任意諸元の歯形と1対1に対応して測定の不確かさを定量化する評価技術を確立した。

この評価技術により、性能の異なる歯車測定機どうして歯形検査作業前に測定精度の差異を定量的に予測することが可能となり、近年重要視されるトレーサビリティ体系の構築も可能となった。なお DBA は国家計量機関で校正されるため、DBAにより校正される歯車測定機も国家標準に対してトレーサブルである。本稿では、上述した任意諸元歯形における測定の不確かさを定量化の手段を下記の順に記述する。

- (1) DBA による測定の幾何学モデル化と解法の定式化
- (2) 校正による歯形計測誤差の不確かさ解析
- (3) 歯形計測誤差の不確かさ解析結果を用いた歯形計測の不確かさシミュレーション法

2. ボールアーティファクトによる校正原理

2.1. ボールアーティファクトの設計

DBA の概略図を Fig. 1 に示す。DBA のデータム面上に

は、Fig. 1(b) のとおり二つの球が配置されており球 A, B は測定時にはそれぞれデータム面に垂直な軸心、インボリュート歯形と見なして機能させる。そのため球 A, B の中心間距離は高精度に位置決めされている必要がある。

Table 1 に製作した DBA の基本仕様を示す。ベースプレートには球 A, B の中心間距離の、測定環境に依存した熱変形量を最小限とするため、極低膨張材のクリアセラムを採用している。なお球の採用は精密加工が容易で、高精度な形状を得やすいのに加え、国家標準に対しトレーサブルな校正が可能のためである。

2.2. 校正原理のモデル化と解法

歯車測定機に DBA を配置したときの概念図を Fig. 2 に、実際の配置の写真を Fig. 3 に示す。歯車測定機の回転テーブル中心位置と DBA の球 A の中心 o の位置は一致するよう配置され、微小な配置誤差は数値補正されている。それを基準に球 B の中心位置が測定開始前の位置 a から角 ε により位置 c まで移動するとき、測定子は基礎円半径 r_b に接する l_1 線上を y 軸と平行に走査する。しかし現実には x 軸は位置決め誤差 e_x を持つため測定子は l_2 線上を移動する。

このとき角 ε を関数とした測定子位置の y 座標は、球 B の中心点 c の y 座標を y_c 、点 c から球 B に接触した測定子の中心位置までの y 成分を Δy とし式(1)で表現される。

一方、測定機の位置決めと測定子の形状に誤差がなく理想的なインボリュートに接して測定子が l_1 線上を走査する

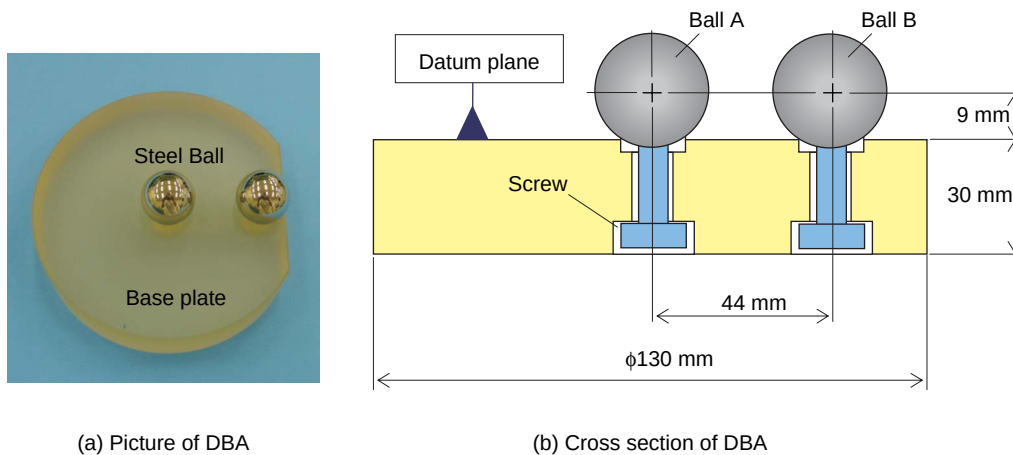


Fig. 1 Schematic of produced DBA

とした場合、測定子の半径を r_p とすれば測定子中心の y 座標は式(2)で表現される。

式(1), (2)より Y_s と Y_l の差 Δf はボールの円弧とインボリュートの形状偏差として式(3)のとおり定義される。

$$\begin{aligned} Y_s &= f(\varepsilon) \\ &= Y_c + \Delta Y \\ Y_c &= C \sin(\varepsilon - \alpha_0), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Delta Y = \sqrt{(r_c + r_p)^2 - (r_b + e_x - C \cos(\varepsilon - \alpha_0))^2}$$

C : マスタ球中心間距離 r_c : マスタ球半径

α_0 : 回転テーブル初期角度 r_p : 測定子半径

ε : ころがり角度 r_b : 基礎円半径

e_x : x 軸位置決め誤差

$$Y_l = r_b \cdot \varepsilon + r_p \quad (2)$$

$$\Delta f = Y_s - Y_l \quad (3)$$

本モデルは回転テーブル初期角度をパラメータ化したことで、近藤によるモデル⁽²⁾に比べ簡単に記述され、パラ

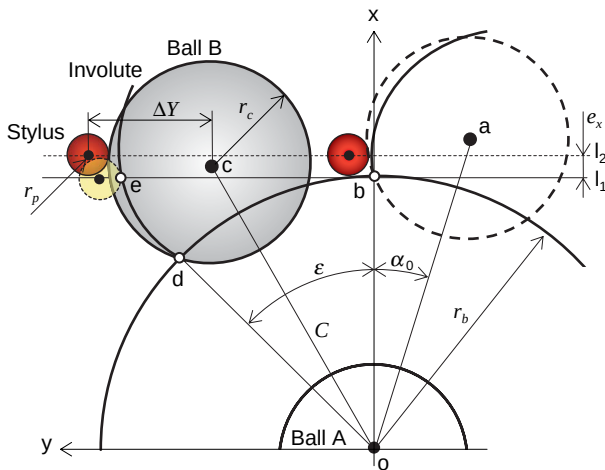


Fig. 2 Schematic model of DBA alignment on gear measuring machine

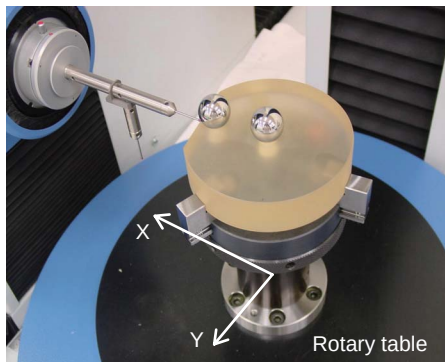


Fig. 3 Picture of DBA alignment on gear measuring machine

メータ推定の演算過程と不確かさ解析の単純化が図れる点に優位性がある。

式(1)において初期角度 α_0 , x 軸位置決め誤差 e_x は機構の設計値から決定されるノミナル値に対して誤差を持つため、同時に校正するパラメータとする。刻々と変化するころがり角度 ε に対して取得される式(3)の形状偏差の理論値ベクトルを Δf_{Theo} , 観測値ベクトルを Δf_{obs} とし、その差を式(4)においてベクトル Y_{obs} とすれば、推定する未知パラメータ p について連立方程式を整理できる。式(4)における p の偏微分係数で構成されるヤコビ行列を A とすれば⁽³⁾, p に設計値を初期値として与えて、式(5)により値を p^+ と更新する非線形最小二乗法(Gauss-Newton 法)から p の収束値が得られる。ここで行列の添え字 t は転置を, S は Y_{obs} の誤差行列を示すが、本解析では測定のパラメータ推定への誤差伝播性を考慮しないため S を単位行列とする。

$$Y_{obs} = \Delta f_{obs} - \Delta f_{Theo}, Y_{obs} = f(p), p = \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ e_x \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$p^+ = (A^t S^{-1} A)^{-1} A^t S^{-1} Y_{obs}, p = p + p^+ \quad (5)$$

歯車測定機の運動誤差として評価すべきパラメータに y 軸の系統的な位置決め誤差 e_y がある。ここでは p と e_y を同時に校正するため、回転テーブルを基準とするころがり角度 ε から e_y を近似多項式より式(6)のとおりモデル化する。

式(6)において B, β はそれぞれ Legendre 関数⁽⁴⁾による基底関数行列とその係数ベクトルである。

このとき Y_{obs} から推定値 p の影響量を除いた観測値 Y_{ey} が y 軸の位置決め誤差に相当するためその関係を式(7)とする。なお e_y は式(7)から最小二乗推定できる。

$$e_y = B\beta, B = (B_0(\varepsilon) \cdots B_n(\varepsilon)), \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \vdots \\ \beta_n \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Y_{ey} &= Y_{obs} - Ap \\ &= B\beta \end{aligned} \quad (7)$$

2.3. 歯形計測誤差と測定機運動誤差の推定結果

歯形計測誤差の推定を目的としたデータ取得として、Table 1 仕様の DBA を用いて歯車の諸元と未知パラメータ推定 p に用いる初期値を Table 2 のとおり設定した。Table 2 の設定における理論曲線 Δf_{Theo} と実測曲線 Δf_{obs} を Fig. 4 に示す。

Fig. 4 の結果において Δf_{Theo} と重なるよう Δf_{obs} を適当に平行移動させたデータを用いて、式(5)から p を算出した結果は Table 2 のとおりとなる。 x 軸と回転テーブルの位置決めに微小な誤差があるのが確認できる。また式(7)から算出した e_y の推定結果は Fig. 5 となり、観測データ Y_{ey} を精度よく近似している。

Table 2 Setting condition for DBA measurement parameters

Parameter	Set value	Estimated value	Unit
Module	7.7639	—	mm
Number of teeth	12	—	—
Radius of base circle	43.7741	—	mm
α_0	16.63802	16.63799	deg
e_x	0	0.4	μm

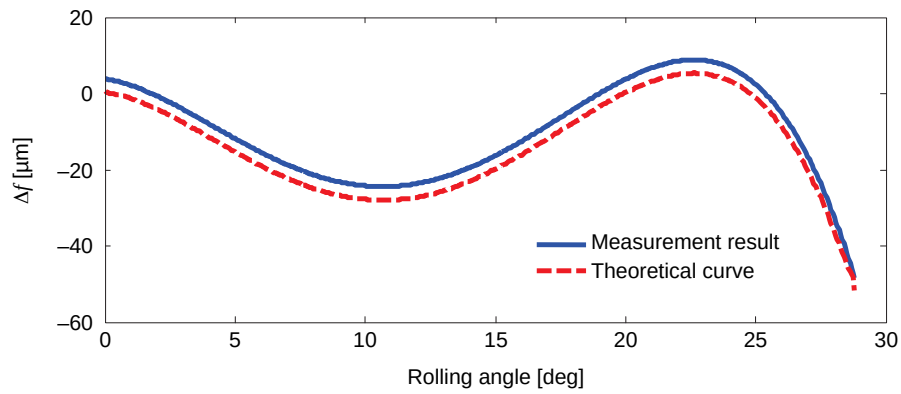


Fig. 4 Example of calibration measurement results

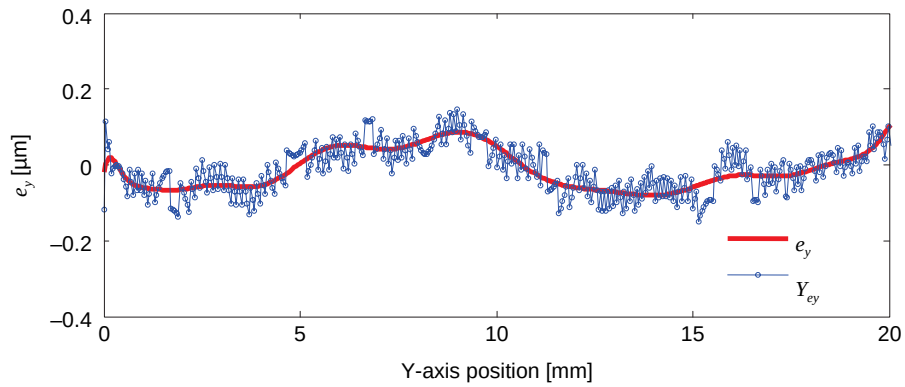


Fig. 5 Estimation result of Y-axis positioning error

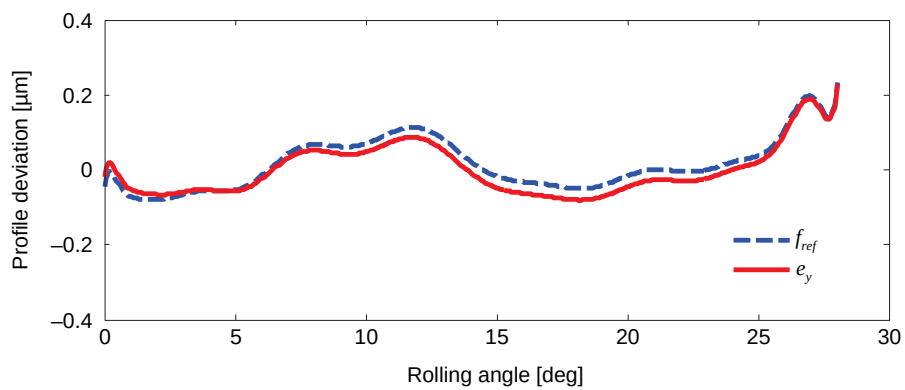


Fig. 6 Estimation result of tooth profile deviation

Table 3 Sources of DBA uncertainty

Uncertainty sources	Symbol	Standard uncertainty	Type of distribution	Type
Length between two master spheres	C	0.13 μm	Normal	B
Radius of master sphere	r_c	60 nm	Normal	B
Thermal coefficient of DBA	α_{DBA}	$0.1 \times 10^{-7}/\text{K}$	Rectangular	B
Temperature of DBA during measurement	t_{DBA}	1 K	Rectangular	A

本手法では一つの観測結果から、測定機が持つ機構の並進、回転成分といった複数の運動誤差が同時に推定可能であり、式(5)における観測値の誤差 s が、算出された運動誤差の信頼性に及ぼす影響を統計的に説明することも容易とする反面、モデルの構築とその演算過程が複雑化する傾向がある。

本手法に対し、複数の測定手段から逐次的に個々の運動誤差を推定する従来手法⁽⁵⁾では、モデル構築が単純であるが、個々の運動誤差測定に対するコストと、複数の測定データから推定された運動誤差の統計的な相互関係を説明するのが困難である。歯形計測誤差はモデル化したパラメータ p , e_y がすべて同時に測定に寄与することを意味するため、 p , e_y の同時寄与を示した Fig. 6 を歯形計測誤差 f_{ref} とする。図中で e_y と f_{ref} の比較をするとその絶対値に差が確認できる。

DBAによる校正において測定機の機構における運動誤差を推定可能としたことにより、歯形計測誤差とその相互関係を定量的に明らかにした。

3. 歯形計測校正結果の不確かさの定量化

3.1. ボールアーティファクトの不確かさ評価

校正から推定した歯形計測誤差を用いて以下を満足する任意諸元の歯形計測の不確かさ評価法の構築を考える。

- (1) 校正結果が、国家標準に対してトレーサブルとなる。
- (2) 不確かさ評価のための予備試験を最小限とし、生産現場において展開が容易な数値演算による方法。

本節では、ボールアーティファクトに依存した歯形計測誤差に寄与する不確かさを定量化する。

式(3)における Δf の合成分散を GUM⁽⁶⁾の指針に従い導く。ここで Y_s , Y_l の合成分散をそれぞれ既知とする必要があるが、 Y_l はノミナル値であるため式(1)における Y_s の合成分散のみを定量化することになる。

Y_s の合成分散は歯車測定機依存の偶然成分の不確かさ項 u_M と DBA 依存の偶然成分の不確かさ項 u_{DBA} とすれば式(8)のとおりに表現される。なおパラメータ p の標準不確かさは、 $u(p)$ と表現するものとする。

ここで r_b は基礎円半径のノミナル値であるため、不確か

さの因子として考慮していない。また u_{DBA} には温度依存の不確かさが考慮されていないが、DBA の線膨張係数 $0.8 \times 10^{-7}/\text{K}$ に対して測定中の温度変化を 1 K と過大に仮定しても、値付けされている球間距離 44 mm に対する熱変形量は $4 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ と微小で無視できるためである。

$$\begin{aligned}
 u^2(Y_s) &= u_M^2 + u_{\text{DBA}}^2 \\
 u_M^2 &= \left(\frac{\partial Y_s}{\partial e_x} \right)^2 u^2(e_x) + \left(\frac{\partial Y_s}{\partial e_y} \right)^2 u^2(e_y) + \left(\frac{\partial Y_s}{\partial r_p} \right)^2 u^2(r_p) + \left(\frac{\partial Y_s}{\partial \varepsilon} \right)^2 u^2(\varepsilon) \\
 u_{\text{DBA}}^2 &= \left(\frac{\partial Y_s}{\partial r_c} \right)^2 u^2(r_c) + \left(\frac{\partial Y_s}{\partial C} \right)^2 u^2(C)
 \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)に対して、DBAの不確かさ因子とその標準不確かさを Table 3 にまとめる。マスタ球の赤道における半径 r_c の精度は、採用した球と同サイズ、同等級の球の真円度測定をおこなった研究結果⁽⁷⁾から 60 nm とした。

測定精度 ($u=0.6+L/1000 \mu\text{m}$, L : 評価長さ mm) を有する座標測定機により取得した球赤道部の形状を Fig. 7(a) に示す。また形状データに対する最小二乗円から形状データとその残差を Δr_c とすれば、 Δr_c の角度に対する自己相関は Fig. 7(b) となり、球の表面形状に加工履歴を予想させる位相に対する周期的な相関が見受けられる。しかし球の真円度 60 nm の評価精度に対して座標測定機による球表面形状測定の精度が十分でないことと、表面形状の相関の有無が u_{DBA} に対して大きく寄与しないことから本解析ではこの相関を無視する。

以上を考慮して式(8)に従った合成標準不確かさ u_{DBA} ($k=1$, k : coverage factor) を算出すると Fig. 8(a) のとおりとなる。

Fig. 8(a) より曲線 Δf の u_{DBA} による信頼性幅は Fig. 8(b) のとおりとなる。 u_{DBA} の不確かさに対して寄与率が最大なのが球中心間距離であるが、中心間距離はレーザ干渉計によって値付けされている。よって式(3)の Δf は、長さにトレーサブルな歯形基準が実現されていることになる。

3.2. 歯車測定機の不確かさ評価

歯車測定機に依存する不確かさ因子は式(1)における歯形計測モデルから e_x , e_y , r_p , ε であり、これらのパラメータにおける標準不確かさを既知とできれば、測定機の歯形計測

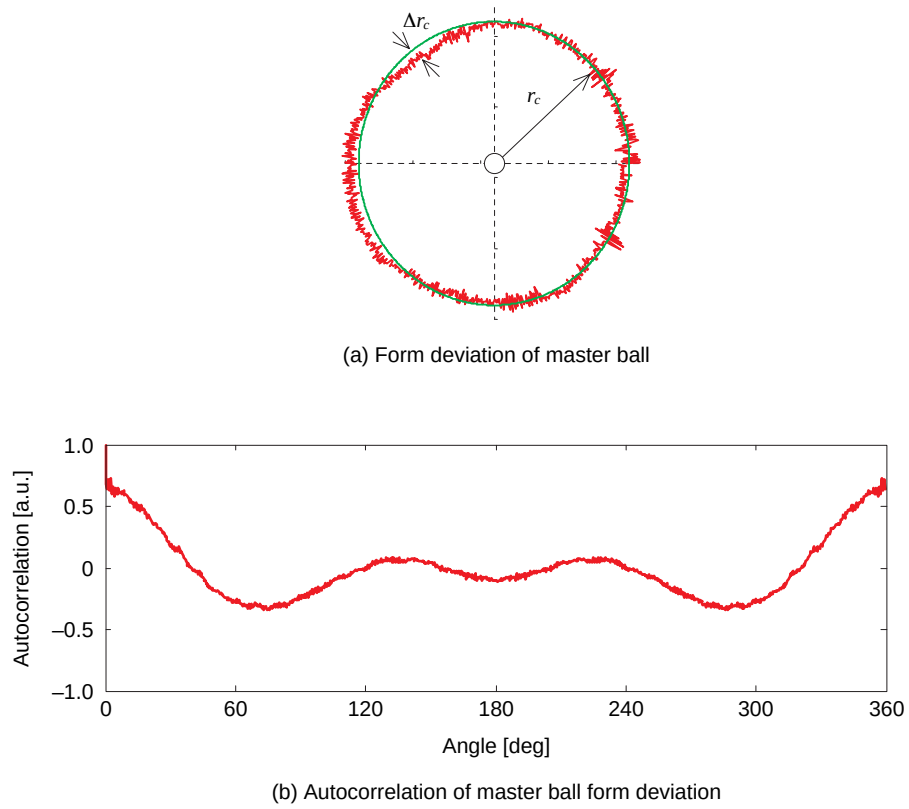


Fig. 7 Form deviation and autocorrelation of master ball on DBA

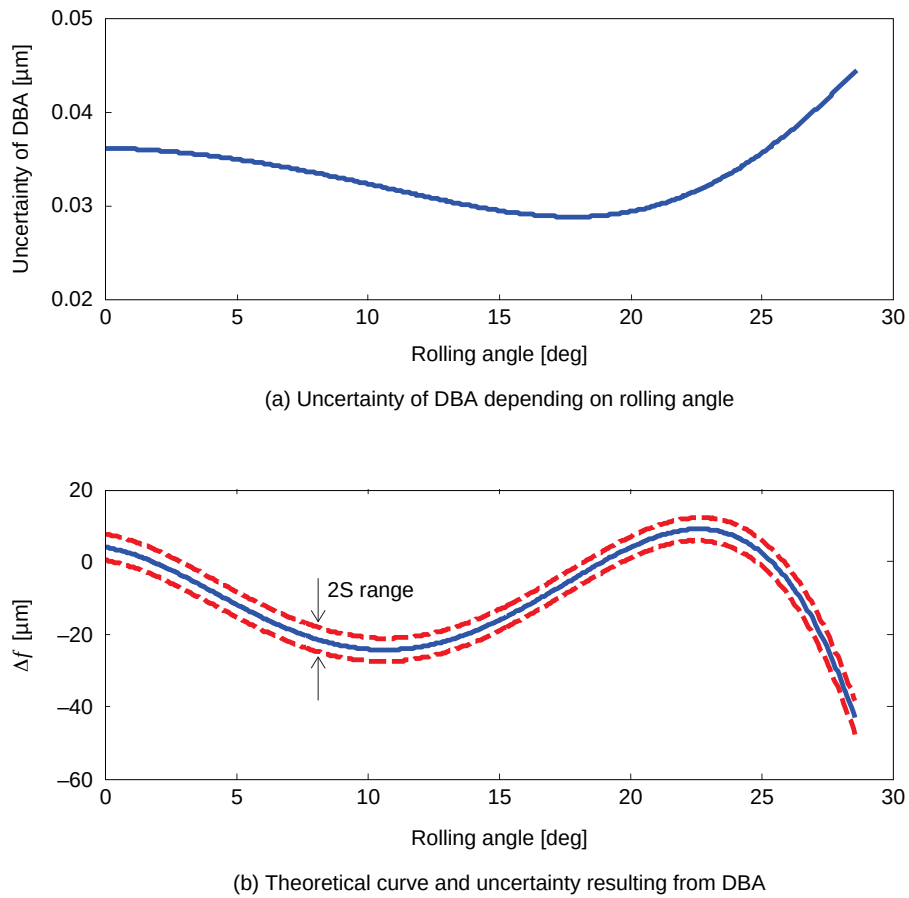


Fig. 8 Uncertainty of DBA estimated from calibration certification of NMIJ (National Metrology Institute of Japan)

の不確かさは誤差伝播則に基づく式(8)から評価できる。

誤差伝播則によらない評価方法として、モデルの不確かさ因子にそれぞれ適当な乱数を同時に発生させるシミュレーションによって最終的な計測の不確かさを推定する手法も研究されている⁽⁸⁾。

上述のシミュレーション法は不確かさの因子である案内軸の位置決め誤差、回転テーブルの位置決め誤差等を事前にレーザ干渉計のような外部測定装置により評価する必要があり、各因子の不確かさは評価装置の不確かさが加算された過大評価となる場合がある。またユーザ自身がこれらの評価作業をおこなうのはコスト的な制限から現実的ではない。

ここでは DBA の繰り返し測定が単純で短時間におこなえることから、DBAより得られるばらつきを式(8)における歯車測定機依存の偶然成分の不確かさ項 u_M として見積もる。 u_M はFig. 9のとおりの角度に依存した変動があり、平均で $0.035\ \mu\text{m}$ の不確かさ $u_{M(Ave)}$ を持つ。なおDBAの不確かさ u_{DBA} と u_M の合成標準不確かさ、すなわち歯形計測誤差の不確かさ u_{com} は u_M の絶対値が微小であること

と、位相に対する顕著な系統性を持たないことから、回転角度によらず一定とし式(9)と定義する。このとき u_{com} はFig. 9中のとおり約 $0.05\ \mu\text{m}$ ($k=1$)の不確かさとなる。

$$u_{com} = \sqrt{u_{M(Ave)}^2 + u_{DBA}^2} \quad (9)$$

3.3. 歯形計測誤差のモンテカルロシミュレーション

定量化された歯形計測誤差の不確かさ u_{com} を用いて、Fig. 6のとおりに推定された歯形計測誤差 f_{ref} に対する繰り返し性をモンテカルロシミュレーションにより再現することを検討する。シミュレーション原理の概略はFig. 10に示すとおりで、下記項目から構成される。本節では、(2)から(4)の過程を定式化する。

- (1) DBAによる測定から推定された歯形計測誤差 f_{ref} を参照値とする。
- (2) 参照値 f_{ref} の位相と1対1に対応した歯形計測誤差の分散行列を構成する。
- (3) 分散行列の特異値分解により測定ランダム誤差を生成する。

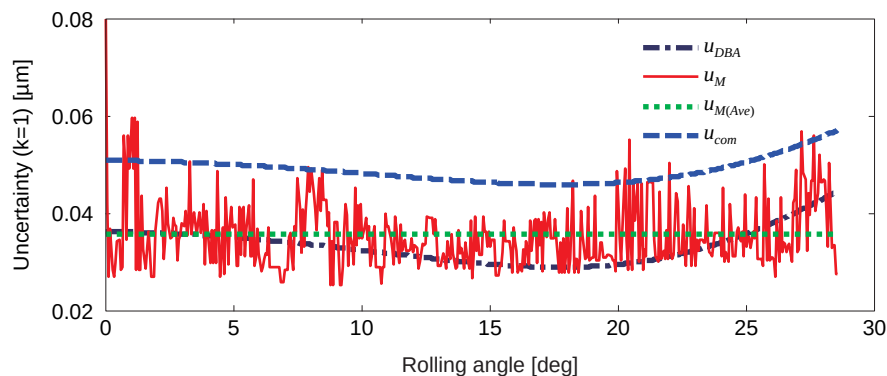


Fig. 9 Combined standard uncertainty of tooth profile measurement

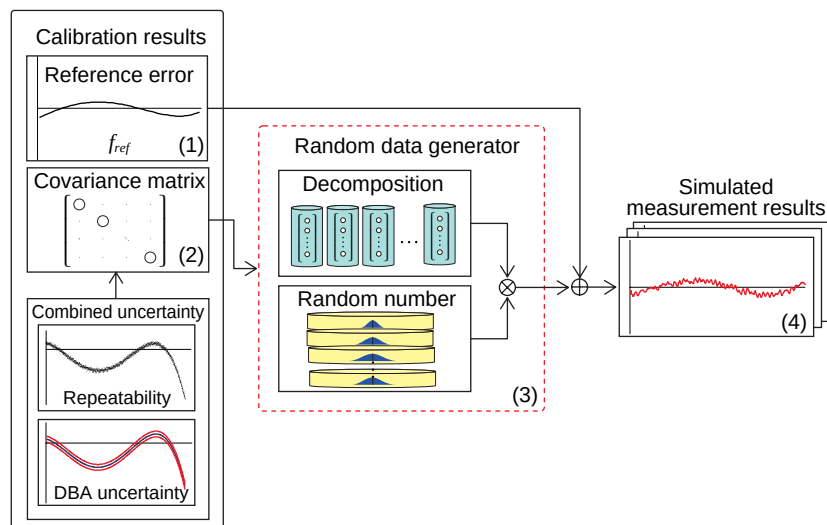


Fig. 10 Statistic simulation method for evaluating uncertainty of tooth profile calibration

(4) 参照値 f_{ref} と測定ランダム誤差の合成による歯形計測誤差のデータを再現する。

校正の分散行列 Σ は参照値 f_{ref} のデータ点数を n とした場合、 $n \times n$ の単位行列を I とすれば式(8)と式(9)から式(10)で表現される。

分散行列 Σ の特異値分解は、 U , V を直交行列とすると式(11)となる。行列 D の対角要素は、それぞれ特異値 s の2乗で、互いに無相関化された正規分布の分散と対応する性質を持つ。

行列 V の各列要素を V_i ($i:1$ から n) とすれば式(12)の1回の試行により、参照値 f_{ref} の位相と1対1に対応した測定ランダム誤差を1組生成できる。なおモンテカルロシミュレーションは、ここでは期待値ゼロの確率変数 $X = (x_1 \cdots x_n)$ を、それぞれ独立に標準偏差1で正規乱数を発生させる過程を指す。なおシミュレーションの試行回数に制限はない。

$$\begin{aligned} \Sigma &= (u_M^2 + u_{DBA}^2) I \\ &\approx u_{com}^2 I \end{aligned} \quad (10)$$

$$\Sigma = UDV^t, D = \begin{pmatrix} s_1^2 & & \\ & \ddots & \\ & & s_n^2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

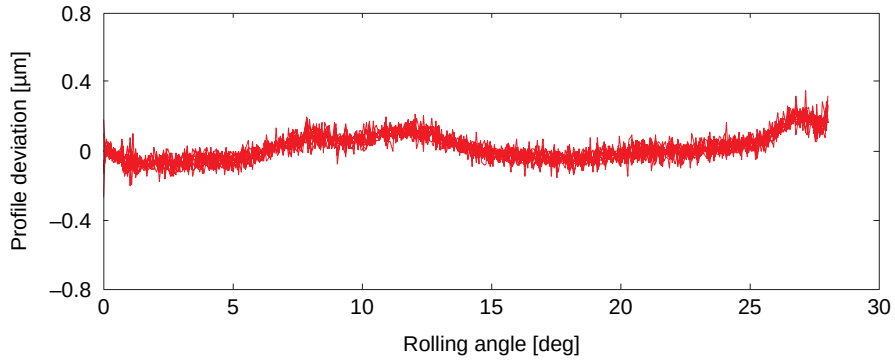
$$f_{ran} = s_1 \cdot x_1 V_1 + s_2 \cdot x_2 V_2 + \cdots + s_n \cdot x_n V_n, V = (V_1 V_2 \cdots V_n) \quad (12)$$

シミュレーション試行例として、 f_{ran} の10回の試行と参照値 f_{ref} による合成で生成された擬似歯形計測誤差データ10組を Fig. 11 に示す。Fig. 11(a) における実測の10回繰り返し結果に比べて Fig. 11(b) の擬似歯形計測誤差データは系統的な傾向は同様であるが、DBAの不確かさが加算されているためランダム成分の振る舞いが大きく、不確かさ因子のばらつきがすべて同時発生しているのが表現されている。

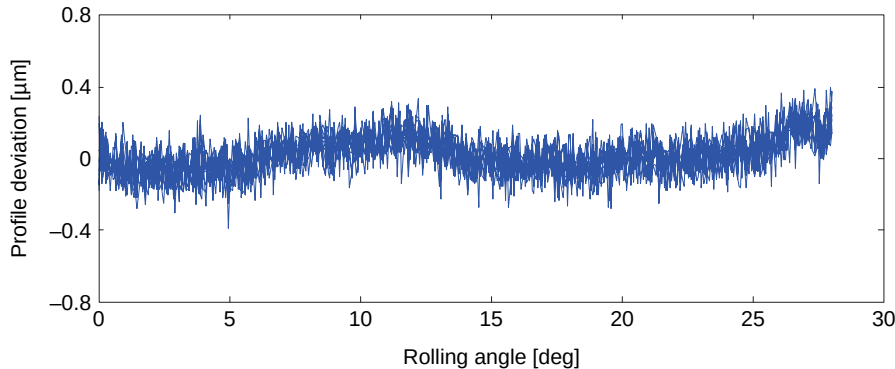
採用したDBAの球間距離の値付けの不確かさは $0.13 \mu\text{m}$ ($k=1$) であったが、公知の技術では球間距離を $0.01 \mu\text{m}$ ($k=1$) で達成できると報告されている⁽⁷⁾。球間距離を $0.01 \mu\text{m}$ で値付けすれば、Fig. 11(b)の擬似された歯形計測誤差のばらつきを数パーセント低減化して見積もることができる。

4. 歯形計測の不確かさ解析

歯形計測のシミュレーション結果と、その結果から推定できる任意諸元に対する歯形計測の不確かさへの換算を図る。Table 3 の DBA の諸元から測定機校正により評価された案内軸 y の最小・最大の移動範囲、 y_{min} から



(a) Profile deviation repeatability observed by DBA



(b) Profile deviation repeatability generated by simulation

Fig. 11 Comparison of tooth profile deviation between observation and simulation

y_{max} は約 0 mm から 25 mm となる。歯車に採用するモジュール m を例えば 0.5 刻みで $0.5 \leq m \leq 3$ mm, ピッチ円直径 D_0 を 20 刻みで $20 \leq D_0 \leq 120$ mm とすれば, それらの検査に要する y 軸の移動範囲は Fig. 12 のとおりとなる。 y_{max} を満たす歯車諸元の範囲は, $D_0 \leq 80$ mm, $m \leq 2.5$ mm である。よってここでは, $20 \leq D_0 \leq 80$ mm, $0.5 \leq m \leq 3.0$ mm を同時に満たす範囲の歯車測定の不確かさを定量化する。

任意の m と D_0 の組み合わせを決定すると, 歯元から歯先までの測定子の走査に必要なころがり角度範囲 ε_{range} と案内軸 y の移動範囲 Y_{range} がそれぞれ式(13), 式(14)と決まり, JIS B1702-1, ISO 1328-1 に従う歯形の検査範囲に相当した案内軸 y の移動範囲が決定する。

$$\varepsilon_{range} = \sqrt{\left(\frac{r_t}{r_b}\right)^2 - 1}, r_b = r_0 \cos(\alpha) \quad (13)$$

r_b : 基礎円半径
 r_t : 歯先円半径
 r_0 : ピッチ円半径
 α : 圧力角

$$Y_{range} = r_b \cdot \varepsilon_{range} \quad (14)$$

案内軸 y の移動範囲に対応した歯形計測誤差 f_{ref} を参照して, 歯形計測シミュレーションをおこなうと Fig. 13 に示すような結果が得られる。ここでは 5 回の試行をおこなっており, シミュレーション試行ごとに平均歯形の最小二乗直線と ISO 1328-1 にて規格化されている歯形誤差のパラメータ, 全歯形誤差 F_α , 歯形形状誤差 f_{fa} , 歯形こう配誤差 $f_{H\alpha}$ を算出したのち, 試行回数に応じた標準偏差を算出する。なお不確かさは, 全歯形誤差を例に平均値を $\bar{F}_\alpha$, 標準偏差を $\sigma(F_\alpha)$ とすれば式(15)のとおりとなる。

$$u(F_\alpha) = \bar{F}_\alpha + 2\sigma(F_\alpha) \quad (k=2) \quad (15)$$

解析結果の一例として Fig. 14 に F_α , f_{fa} , $f_{H\alpha}$ を示す。 F_α , f_{fa} はピッチ円直径, モジュールと不確かさの関係に線形性があるのが確認できる。

歯形計測の校正と校正のシミュレーションに基づく, 本不確かさ評価の利点は以下のとおりである。

- (1) 測定機の不確かさ評価に必要な予備試験, 校正作業を最小限とし, 歯形計測誤差評価における測定の統計的性質の代数的なモデル化と演算により歯形計測の擬似を可能としたことで, 測定作業による統計的評価の労力を不要とした。
- (2) 任意諸元の歯形に対する必要な精度を歯形計測のシミュレーションにより事前に既知とでき, 検査結果一点一様に不確かさを保証することを可能とした。
- (3) 解析された歯形誤差パラメータの不確かさは, DBA の不確かさが考慮されており国家標準にトレーサブルであるため, 複数の測定機間の精度差を一律に評価可能とした。

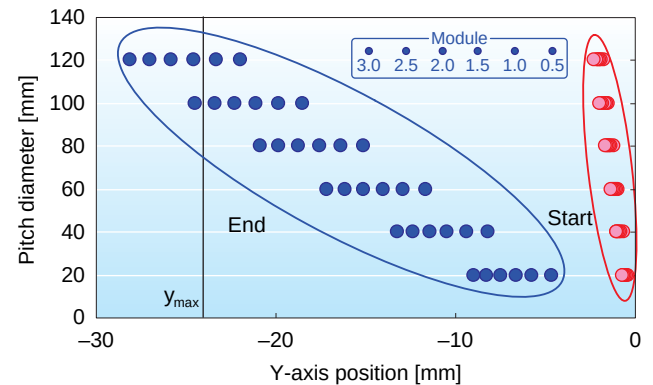


Fig. 12 Range of Y-axis movement for tooth profile measurements

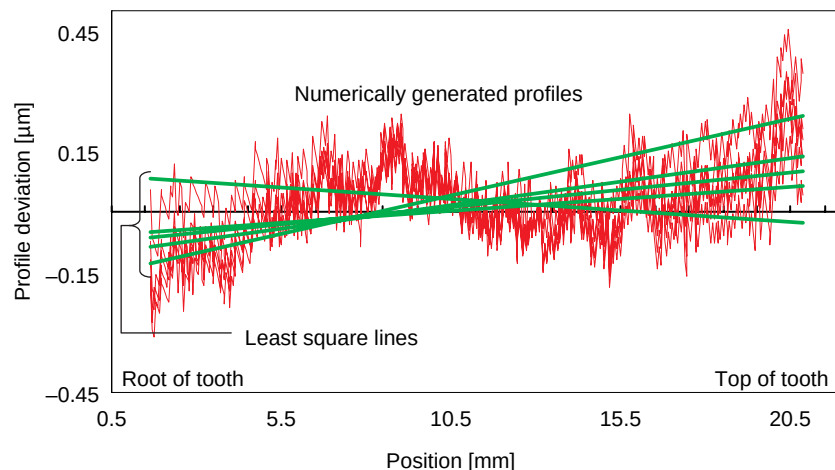
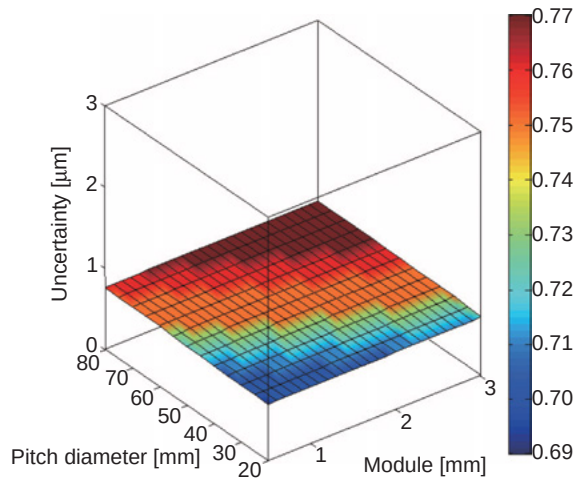
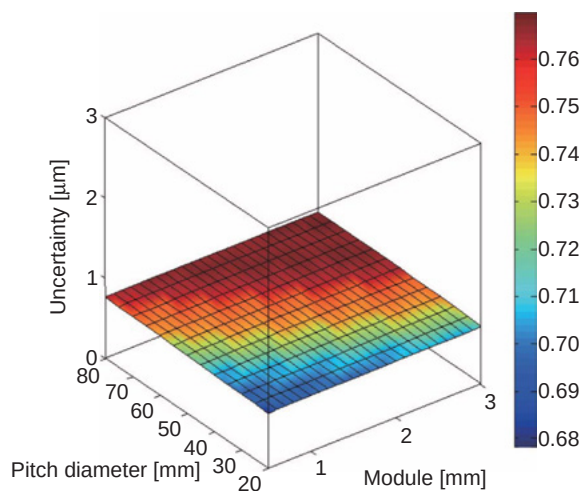


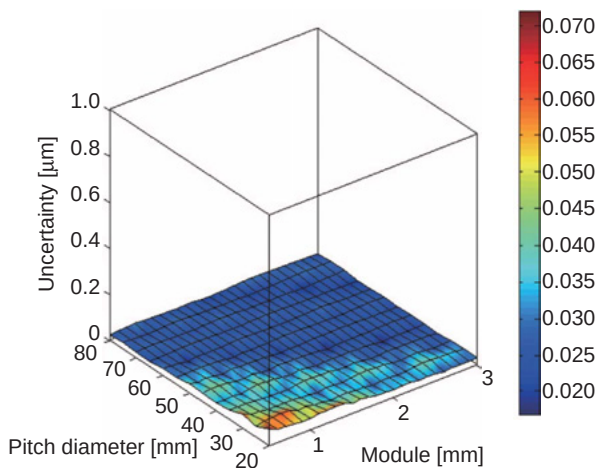
Fig. 13 Generated tooth profile deviation and average tooth profiles by simulation



(a) Uncertainty evaluation for F_{α}



(b) Uncertainty evaluation for $f_{f\alpha}$



(c) Uncertainty evaluation for $f_{H\alpha}$

Fig. 14 Examples of uncertainty evaluation ($k=2$)

5. 結言

DBAにより歯形計測の校正をおこない、校正結果から任意諸元の歯形と1対1に対応して歯形計測の不確かさを定

量化することを目的とした評価技術の確立をおこなった。得られた結論を以下に記す。

- (1) DBAによる校正のモデル化と測定機の機構における運動誤差の推定法を定式化した。この方法により歯形計測誤差と運動誤差の定量的な相互関係を明らかにした。
- (2) 歯形計測の不確かさを代数モデル化し、特異値分解を利用してその演算結果からトレーサビリティが確保された歯形計測をシミュレートする方法を定式化した。
- (3) シミュレーションから、任意諸元の歯形計測における歯形誤差パラメータの不確かさを評価する方法を導出した。

参考文献

- (1) 久保愛三, 小森雅晴: 京機短信, No.3, p.1-2(2004)
- (2) 近藤孝之: 歯形測定機の校正原器と校正法の新提案, 日本機械学会年次大会講演論文集, Vol.8, p.508-515(2005)
- (3) 中川徹, 小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版, p.35(1982)
- (4) 篠崎壽夫, 松下裕輔: 応用数値計算法入門(上), コロナ社, p.175(1976)
- (5) Zhang, G.: A Displacement Method for Machine Geometry Calibration, Annals of the CIRP, Vol.37, No.1, p.515-517(1998)
- (6) BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML: Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO, First edition(1993)
- (7) 近藤余範, 野口昭治, 近藤孝之, 大澤尊光, 直井一也, 高辻利之, 黒澤富蔵: ボールアーティファクトによる歯形計測精度の評価—国家標準にトレーサブルなボール中心間距離測定装置の開発—, 精密工学会誌, Vol.71, No.10, p.1260-1265(2005)
- (8) Tanaka, H., Shimojo, M., Kajitani, M., Sato, T., Takeda, R., Kojima, M., Yuzaki, M., Kato, S., Shibuya, Y., Kondo, T.: Evaluation of measurement uncertainty in gear measuring instruments by the Monte Carlo simulation, The American Society for Precision Engineering, Proceedings of the Eighteen Annual Meeting, p.395-398(2003)

■著者■



梅津 健太



石戸 亘



藤原 欣哉