座標測定機のアーティファクト校正（第 3 報）*

－校正後の測定の不確かさの推定－

高増　潔**　佐藤　理***　下嶋　賢†　古谷涼秋†

Artifact Calibration of Coordinate Measuring Machine (3rd Report)
– Estimation of Uncertainty of Measurements After Calibration –

Kiyoshi TAKAMASU, Osamu SATO, Ken SHIMOJIMA and Ryoshu FURUTANI

Calibration methods for 3D mechanisms are necessary to use the mechanisms as coordinate measuring machines. The calibration method of the coordinate measuring machine using artifacts, artifact calibration method, has been formulated in taking account of traceability of the mechanism. In this article, estimation methods of uncertainties using the calibrated coordinate measuring machine are formulated. Firstly, a variance and covariance matrix on measuring points is calculated from a variance and covariance matrix of the kinematic parameters of the calibrated measuring machine. Secondly, uncertainties of a size measurement or a point measurement in a workpiece coordinate system are estimated using the error propagation method. Therefore, the estimation methods of uncertainties on the specified measuring tasks are formulated in the artifact calibration.

Key words: geometric calibration, kinematic calibration, coordinate measuring machine, uncertainty of measurement

1.　緒　　言

三次元機構を座標測定機として使用するためには，順運動学によりプローブの座標値が得られることが必要であり，順運動学解を得るために必要なパラメータを校正作業により求めなければならない．第 1 報[1] では，運動学校正を「その機構の要素が幾何学的に誤差のない形状と見なせ，案内が完全である場合に，その機構の運動学を記述するのに必要な寸法パラメータ（長さ，位置および角度）を運動学パラメータとして求める」と定義した．

従来の座標測定機の校正に関する研究では，直交系の座標測定機に関するもの[2) ~4)] が中心で，他の三次元機構に関する研究[5)6)]はあまり行われていない．第 1 報および第 2 報[7)]では，非直交系の座標測定機を校正する場合について検討した．校正では，トレーサビリティを確保する必要があることから，アーティファクトによる校正が重要となる．第 1 報では，アーティファクトを使ったアーティファクト校正による運動学校正の方法について，理論的な検討を行い，最小二乗法について数学的に記述した．また，校正したパラメータの不確かさ[8) ~11)] についても検討した．

しかし，これまでの不確かさ推定は，校正した運動学パラメータおよび測定機座標系における測定座標の不確かさであって，寸法測定やワーク座標系における測定座標の不確かさの推定は行われていない．三次元機構を座標測定機として使用する場合には，校正した運動学パラメータの不確かさから，その機構を座標測定機として使った場合の測定の不確かさを推定する方法の定式化が必要である．本報告では，測定作業における不確かさ推定手法を定式化する．

*　原稿受付　平成 16 年 9 月 30 日
**　正 会 員　東京大学大学院工学系研究科（東京都文京区本郷 7-3-1）
***　正 会 員　産業技術総合研究所（つくば市梅園 1-1-1）
†　正 会 員　東京電機大学工学部（東京都千代田区神田錦町 2-2）

2.　測定点の不確かさ評価

2.1　運動学パラメータの不確かさ

前報までで示したように，前述した定義に基づく運動学パラメータの不確かさは，校正作業における誤差伝播により求めることができる．式（1）により，座標測定機の順運動学において，座標測定機を表現する運動学パラメータ $\mathbf{p}$ と，測定値であるエンコーダの読み $\mathbf{q}$ から手先座標 $\mathbf{x}$ が計算される．本報では，式や図を分かりやすくするために，二次元の座標測定機を考えて説明するが，これを三次元に拡張することは容易である．

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{p},\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix},\ \mathbf{p} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \end{pmatrix},\ \mathbf{q} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \end{pmatrix} \tag{1}$$

第 1 報で示したように，校正された座標測定機の運動学パラメータなどの不確かさは，アーティファクトの測定値が含む不確かさからパラメータへの誤差伝播の式（式（2））で計算される[1) 12)]．ここで $\mathbf{A}$ は校正作業におけるヤコビ行列，$\mathbf{S}$ は校正作業における誤差行列である．この校正作業の結果として 2 種類のパラメータが求まる．ひとつは，順運動学を表現する運動学パラメータ $\mathbf{p}$ であり，もうひとつは，アーティファクト座標系への変換パラメータ $\mathbf{r}$ である．式（2）の左辺をこの 2 つのパラメータに対応して分割すると，$\mathbf{S}_p$ は運動学のパラメータ $\mathbf{p}$ の不確かさの分散共分散，$\mathbf{S}_r$ はアーティファクト座標系への変換パラメータ $\mathbf{r}$ の不確かさの分散共分散，$\mathbf{S}_{pr}$ は $\mathbf{p}$ と $\mathbf{r}$ の共分散を表すことになる．

$$\begin{pmatrix} \mathbf{S}_p & \mathbf{S}_{pr} \\ \mathbf{S}_{pr} & \mathbf{S}_r \end{pmatrix} = (\mathbf{A}^t\ \mathbf{S}^{-1}\ \mathbf{A})^{-1} \tag{2}$$

ここでは，校正後の測定点の不確かさを評価するので，アーティファクト座標系への変換パラメータ $\mathbf{r}$ に関係する情報は不要となる．そのため，校正後の測定点の不確かさを評

価するために必要な情報は，運動学パラメータの分散共分散行列 $\mathbf{S}_p$ だけである．

2.2　校正後の測定点の不確かさの評価

校正後の測定点 $\mathbf{x}$ の測定点の座標の不確かさ $\mathbf{T}_1$ は，測定点のX座標とY座標の不確かさの分散および共分散である．これを計算するには，3 種類の要因を考慮する必要がある．校正された運動学パラメータ $\mathbf{p}$ が持つ不確かさが測定点へ伝播する不確かさ $\mathbf{T}_p$，エンコーダの値 $\mathbf{q}$ が持つ不確かさが測定点へ伝播する不確かさ $\mathbf{T}_q$，プロービングなどによる不確かさ $\mathbf{T}_m$ である．この 3 種類の不確かさを合成することで，測定点の不確かさが計算できる．

この 3 種類の要因が測定点の座標間の不確かさの相関にどのように影響するかを考えると，**表 1** のように仮定することができる．$\mathbf{T}_p$ では，全ての測定点の各座標に対して相関が生じる．$\mathbf{T}_q$ では，エンコーダが単体で充分校正されていると考えて，異なる測定点では相関は生じないこととしたが，同じ測定点のX座標とY座標の間には相関が生じる．$\mathbf{T}_m$ は，完全にランダムで相関が生じないとした．もし，エンコーダやプロービングに周波数特性や系統的な不確かさがある場合には，ここでは無視している相関も考慮すべきである．以上の仮定から，3 つの要因の不確かさの計算方法を以下に示す．

測定点 $\mathbf{x}$ に対応した $\mathbf{p}$ によるヤコビ行列 $\mathbf{A}_p$は，評価したい測定点における順運動学 $\mathbf{f}$ をパラメータ $\mathbf{p}$ で偏微分することで計算できる．$\mathbf{A}_p$ と $\mathbf{S}_p$ より，パラメータの不確かさによる測定点への不確かさ $\mathbf{T}_p$ が計算できる（式 (3)）．

エンコーダの読み $\mathbf{q}$ によって順運動学 $\mathbf{f}$ を偏微分することで計算されるヤコビ行列 $\mathbf{A}_q$ とエンコーダの不確かさの分散共分散行列 $\mathbf{S}_q$ により $\mathbf{T}_q$ が計算できる（式 (4)）．エンコーダの不確かさがそれぞれのエンコーダ間で独立，分散が同じ場合には，$\mathbf{S}_q$ は単位行列 $\mathbf{E}$ とエンコーダの不確かさの分散の積となり，ヤコビ行列との積を取ることで $\mathbf{T}_q$ が計算される（式 (5)）．

プロービングの不確かさ $\mathbf{T}_m$ は，XY座標ともに独立で同じ大きさを持つと仮定する．この場合は，単にプロービングの不確かさの標準偏差 s_m の二乗と単位行列 $\mathbf{E}$ の積となる（式 (6)）．

以上より，1 点の測定点の不確かさ $\mathbf{T}_1$ は，3 つの不確かさを合成して式 (7) で計算できる．ここで，$\mathbf{T}_1$ の対角成分が測定点のX座標の不確かさの分散 sx^2 およびY座標の不確かさの分散 sy^2 を，非対角成分がX座標とY座標の不確かさの共分散 sxy を表している．

$$\mathbf{A}_p = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{p}}, \quad \mathbf{T}_p = \mathbf{A}_p \mathbf{S}_p \mathbf{A}_p^t \tag{3}$$

$$\mathbf{A}_q = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{q}}, \quad \mathbf{T}_q = \mathbf{A}_q \mathbf{S}_q \mathbf{A}_q^t \tag{4}$$

$$\mathbf{S}_q = s_q^2 \mathbf{E}, \quad \mathbf{T}_q = s_q^2 \mathbf{A}_q \mathbf{A}_q^t \tag{5}$$

$$\mathbf{T}_m = s_m^2 \mathbf{E} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{T}_1 &= \begin{pmatrix} sx^2 & sxy \\ sxy & sy^2 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_p + \mathbf{T}_q + \mathbf{T}_m \\ &= \mathbf{A}_p \mathbf{S}_p \mathbf{A}_p^t + s_q^2 \mathbf{A}_q \mathbf{A}_q^t + s_m^2 \mathbf{E}\end{aligned} \tag{7}$$

Table 1　Correlations between different measuring points and, X and Y coordinates of same measuring point relation to the uncertainties $\mathbf{T}_p$, $\mathbf{T}_q$ and $\mathbf{T}_m$

source	uncertaity	different point	X and Y coordinates
kinematic parameter	$\mathbf{T}_p$	yes	yes
encoder	$\mathbf{T}_q$	no	yes
probing	$\mathbf{T}_m$	no	no

2.3　複数の測定点の不確かさの評価

$\mathbf{T}_1$ は測定機座標系における測定点の座標の不確かさである．このため，順運動学において，測定機座標系および運動学パラメータの設定方法によって値は変わってくる．座標測定機の使い方を考えた場合には，測定は，測定機座標系では行われず，ワーク座標系で行われる．そこで，ワーク座標系における測定点の不確かさ評価が必要となる．

ワーク座標系を作ることを考えて，式 (7) を複数の測定点の不確かさを計算する場合に拡張する．式 (8) ～ (10) は，式 (7) を n 個の測定点へ拡張する方法を示している．運動学パラメータは各測定点に相関を与えるため，ヤコビ行列 $\mathbf{A}_p$ を式 (8) のように各測定点のヤコビ行列を縦に並べたものに置き換える必要がある．このヤコビ行列を式 (3) に適用することで拡張した $\mathbf{T}_p$ を計算できる．エンコーダの不確かさについては，異なる測定点では独立で，同じ測定点の座標間には相関があるため，各測定点の $\mathbf{T}_{qi}$ を計算し，それを対角に並べた $\mathbf{T}_q$（式 (9)）から計算できる．プロービングなどの影響は，測定点の座標間でも独立なので，式 (6) と同様に単位ベクトルとの積として計算できる．

結果として，n 個の測定点の座標の不確かさの分散共分散行列 $\mathbf{T}_{1\text{-}n}$ が式 (10) の形で計算できる．$\mathbf{T}_{1\text{-}n}$ の対角成分は，それぞれの測定点のX座標およびY座標の不確かさの分散であり，非対角成分は，それぞれの測定点の座標間の共分散である．この計算によって，2 つ以上の測定点の座標間の共分散も計算できる．

$$\mathbf{A}_p = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{p_1} \\ \vdots \\ \mathbf{A}_{p_n} \end{pmatrix} \tag{8}$$

$$\mathbf{T}_q = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_{q1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \mathbf{T}_{qn} \end{pmatrix} \tag{9}$$

$$\mathbf{T}_{1-n} = \begin{pmatrix} sx_1^2 & sx_1y_1 & sx_1x_2 & \cdots & sx_1y_n \\ sx_1y_1 & sy_1^2 & sy_1x_2 & & sy_1y_n \\ sx_1x_2 & sy_1x_2 & sx_2^2 & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \\ sx_1y_n & sy_1y_n & \cdots & & sy_n^2 \end{pmatrix} \tag{10}$$

2.4　2 つの測定点による寸法測定の不確かさの評価

複数の測定点を利用した不確かさの評価の例として，2 つの測定点による寸法測定の不確かさの評価方法を示す．このためには，まず，2 つの測定点の座標の分散共分散行列 $\mathbf{T}_{1\text{-}2}$ を 2.3 節に従って計算する．

2 つの測定点 $\mathbf{x}_1$ および $\mathbf{x}_2$ による寸法 d を計算する $\mathbf{G}_d$ は，式 (11) のように解析的に簡単に書け，その偏微分によるヤコビ行列 $\mathbf{A}_d$ も解析的に求められる．式 (12) により $\mathbf{G}_d$

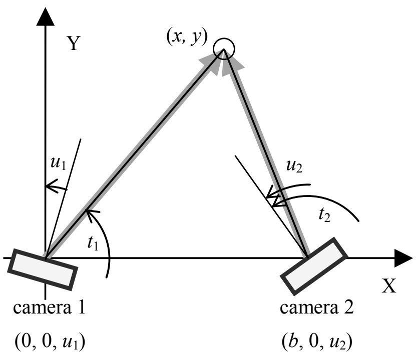


Fig. 1 Two dimensional coordinate measuring system by two line cameras has three kinematic parameters; offset angles of vision line of line cameras u_1, u_2 and length of baseline b

における $\mathbf{T}_{1\text{-}2}$ からの不確かさの伝播を考えれば，2 つの測定点による寸法測定の不確かさの分散 s_d^2 が計算できる．

$$\begin{aligned} d &= \mathbf{G}_d(\mathbf{x}_1,\mathbf{x}_2) = \sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}, \\ \mathbf{A}_d &= \begin{pmatrix} \dfrac{\partial \mathbf{G}_d}{\partial \mathbf{x}_1} & \dfrac{\partial \mathbf{G}_d}{\partial \mathbf{x}_2} \end{pmatrix} \\ &= \frac{\begin{pmatrix} -x_1+x_2 & -y_1+y_2 & -x_1+x_2 & -y_1+y_2 \end{pmatrix}}{\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}} \end{aligned} \tag{11}$$

$$s_d^2 = \mathbf{A}_d\,\mathbf{T}_{1-2}\,\mathbf{A}_d^t \tag{12}$$

2.5　ワーク座標系における測定点の座標の不確かさ

つぎに，座標測定機によってワーク座標系を作り，ワーク座標系の中で測定した場合の測定点の座標の不確かさの評価方法を示す．ワーク座標系を作る方法は，種々の方法があるが，2 つの測定点の中点で原点を，2 つの測定点の方向で X 軸を作ることにする．そして，このワーク座標系において，3 つめの測定点の X 座標と Y 座標の不確かさを考える．

3 つの測定点の座標の不確かさの分散共分散行列 $\mathbf{T}_{1\text{-}3}$ を 2.3 節に従って計算する．この 3 つの測定点の座標からワーク座標系における 3 つめの測定点の座標 $\mathbf{x}_c$ を計算する計算式を $\mathbf{G}_c$ とする（式 (13)）．$\mathbf{G}_c$ におけるヤコビ行列 $\mathbf{A}_c$ により不確かさの伝播を考えれば，3 つめの測定点のX座標とY座標の不確かさの分散（sx_c^2およびsy_c^2）が計算できる（式 (14)）．

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} &= \mathbf{x}_c = \mathbf{G}_c(\mathbf{x}_1,\mathbf{x}_2,\mathbf{x}_3) = \\ &\begin{pmatrix} \dfrac{\left(x_3-\dfrac{x_1+x_2}{2}\right)(x_2-x_1)+\left(y_3-\dfrac{y_1+y_2}{2}\right)(y_2-y_1)}{\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}} \\ \dfrac{\left(y_3-\dfrac{y_1+y_2}{2}\right)(x_2-x_1)-\left(x_3-\dfrac{x_1+x_2}{2}\right)(y_2-y_1)}{\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}} \end{pmatrix}, \\ \mathbf{A}_c &= \begin{pmatrix} \dfrac{\partial \mathbf{G}_c}{\partial \mathbf{x}_1} & \dfrac{\partial \mathbf{G}_c}{\partial \mathbf{x}_2} & \dfrac{\partial \mathbf{G}_c}{\partial \mathbf{x}_3} \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{pmatrix} sx_c^2 & sxy_c \\ sxy_c & sy_c^2 \end{pmatrix} = \mathbf{A}_c\,\mathbf{T}_{1-3}\,\mathbf{A}_c^t \tag{14}$$

3.　計　　算　　例

3.1　ラインカメラによる三角測量システムの校正

二次元座標系において 2 つのラインカメラによる三角測量システムを利用して計算例を示す．**図 1** は，カメラ 1 とカメラ 2 による二次元三角測量を示している．ここで，測定機座標系はカメラ 1 の位置を原点，カメラ 2 の位置の方向をX軸とする．この座標測定システムの運動学パラメータは，カメラ 1 およびカメラ 2 の視線方向のオフセット角 u_1 および u_2，カメラ 2 のX座標 b の 3 種類である．エンコーダの値として，測定点に対する角度データ t_1 および t_2 がカメラ 1 とカメラ 2 によって得られる．

この座標測定システムの順運動学は，式（15）のように書くことができる．

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &= \mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{p},\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} \dfrac{b\tan(t_2-u_2)}{\tan(t_2-u_2)-\tan(t_1-u_1)} \\ \dfrac{b\tan(t_1-u_1)\tan(t_2-u_2)}{\tan(t_2-u_2)-\tan(t_1-u_1)} \end{pmatrix}, \\ \mathbf{p} &= \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ b \end{pmatrix},\quad \mathbf{q} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{15}$$

不確かさは，前章で述べた方法をこの順運動学に適用することで計算できる．実際の計算例を示すために，カメラ 2 の位置を $b = 200$ mm とし，測定範囲としては，XY 座標でそれぞれ 50 mm から 150 mm の範囲を考えることとした．校正方法は，外部測定機を使う方法として，測定範囲を均等な校正点によって校正する場合を考えた．

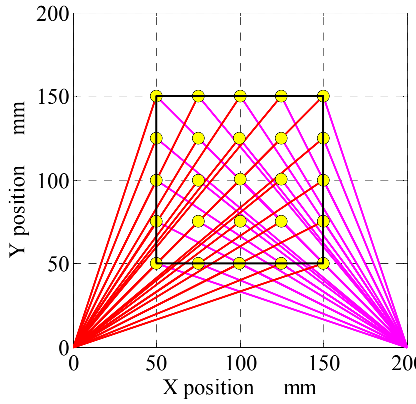


Fig. 2 Calibration points for the two dimensional line camera system; no. of points: 25 in X of 50-150 mm and Y of 50-150 mm at 25 mm intervals, the camera 1 is located at (0, 0) and the camera 2 is located at (200, 0)

Table 2 Calibration results from Fig. 2; standard deviations of three kinematic parameters and correlation coefficients between parameters

	standard deviation	correlation coefficient for	
		u_2	b
u_1	0.0042 deg	0.0057	−0.4764
u_2	0.0042 deg	-	0.4763
b	15.7 μm	-	-

図 2 に示すように，測定範囲内に 25 mm 間隔に 25 の校正点を設定した．測定機座標系において，右下（0, 0）と左下（200, 0）にカメラ 1 およびカメラ 2 が設置されている．校正に使った点は，実線の四角で示す測定範囲内で丸印の 25 点である．校正の条件として，校正点のプロービングのランダムな不確かさを 10 μm，校正に使った外部測定機のランダムな不確かさを 5 μm とし，合計して校正点には標準偏差が 11.2

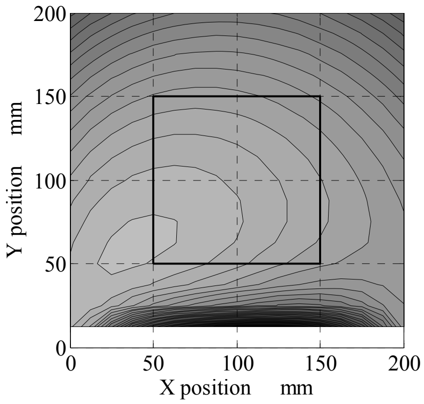


Fig. 3 Position uncertainties in the measuring machine coordinate system after the calibration

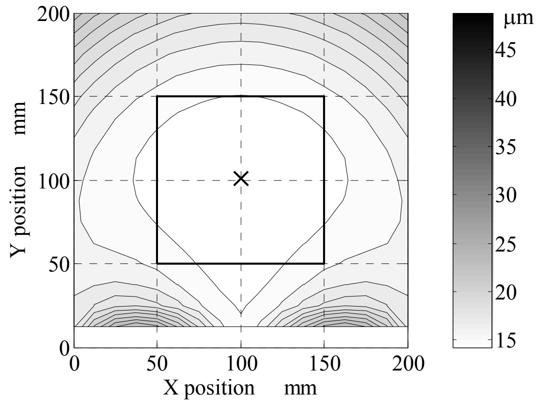
µm のランダムな不確かさを与えた．また，測定機の角度測定のランダムな不確かさを 0.001 度とした．**表 2** に校正結果を示す．運動学パラメータ u_1，u_2 および b が校正点およびエンコーダの不確かさのレベルで求められている．また，u_1 と u_2 の相関は小さいが，u_1，u_2 と b にはそれぞれ正と負のかなり大きい相関がある．

3.2　測定機座標系での評価および寸法測定の評価

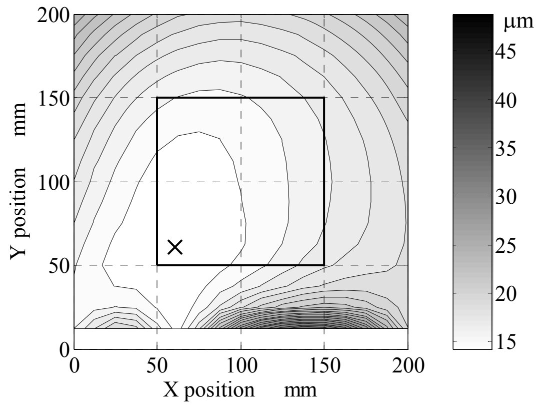
図 3 は，この条件で校正した後，測定機座標系における測定点の不確かさを計算した結果である．式（7）に従って，それぞれの座標点における $\mathbf{T}_1$ を計算し，X座標の不確かさ sx とY座標の不確かさ sy の二乗和平方根を求めて等高線表示した．図 3，図 4 および図 6 は比較が容易なように，同一の濃淡レベルを使っている．プロービングなどの不確かさ s_p として 10 µm，エンコーダの不確かさ s_q として 0.001 度を与えた．測定範囲の中では，不確かさの最小が 24.0 µm，最大が 29.0 µm である．しかし，この評価は測定機座標系における評価なので，測定機座標系やパラメータの設定方法で結果が異なってくる．この場合も，校正点を対称に取っているにも関わらず校正結果が対称になっていない．

図 4 は，2 つの測定点による寸法測定の不確かさ s_d を式（12）に従って計算した結果で，（a）は測定範囲の中心の点（100, 100）を $\mathbf{x}_1$ として，$\mathbf{x}_2$ を測定範囲外も含めて取った場合の不確かさを等高線表示している．測定の不確かさは，測定範囲内では，最小 14.1 µm，最大 15.6 µmとなり，左右対称の不確かさ分布が計算できている．もし，測定の不確かさがランダムだとして図 3 によって寸法測定を評価すると，最小でも 24 µmの 1.4 倍の不確かさが生じることになり，測定の不確かさを過大評価することになる．（b）は測定範囲の端の点（60, 60）の点を $\mathbf{x}_1$ としている．測定範囲内では，最小 14.2 µm，最大 17.5 µm の不確かさが生じている．

測定寸法とその不確かさの関係を測定範囲の多くの点の組合せに対して計算し，測定寸法と不確かさの関係を**図 5** に表示した．この図によって，この座標測定機の測定寸法と測定の不確かさの関係を評価することができる．図 5 の各測定寸法における最大の不確かさは，その測定寸法において一番測定精度が悪い位置における測定の不確かさを示しているので，最悪の位置で寸法測定を行っても，この値の 2 倍以内に 95% の測定の不確かさは入ることになる．この例に，一般的な測定機の精度評価の評価法を適用させると，最大許容値を太線のように表現し，この 2 倍が測定機の寸法測定の最大許容不確かさとなり，寸法測定 L（mm）に対して，$29.6\ \mu m + 0.072\ L < 36.6\ \mu m$ となる．このように測定機の最大許容不確かさ評価と校正の関係を計算することができた．



(a) Size measurement uncertainties from a point at (100, 100)



(b) Size measurement uncertainties from a point at (60, 60)

Fig. 4 Size measurement uncertainties from the specified points after the calibration

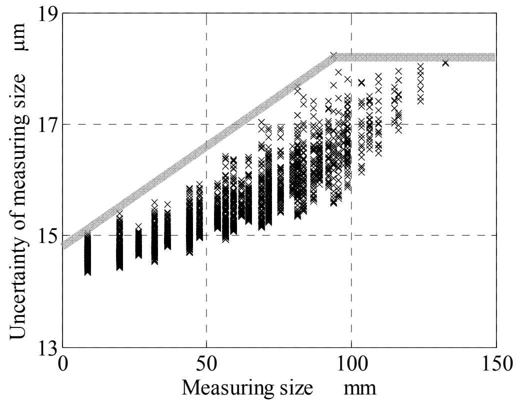


Fig. 5 Relationship between measuring sizes and uncertainties in the measuring range after the calibration, thick line displays limit of uncertainties

3.3　ワーク座標系での不確かさ評価

図 6 は，測定範囲の中心を原点になるように，（60, 100）および（140, 100）の２点でX軸の方向を決めたワーク座標系を取った場合の，各測定点のX座標の不確かさ sx_c およびY座標の不確かさ sy_c を式（14）に従って計算し，その二乗和平方根を等高線表示した例である．図 3 と違って，測定範囲内で中心に対して同心円状の不確かさパターンが評価され，指定

したワーク座標系における測定点の座標の不確かさの評価が可能となった．

図 7 は，図 6 の条件で測定範囲の中心からの距離と測定点の不確かさの関係を図示したものである．指定したワーク座標系において，測定位置と測定不確かさの関係の評価が可能である．

4. 結　　論

本論文では，座標測定機を校正した後に，その座標測定機を使って測定を行った場合の不確かさ評価の方法の理論的な定式化を行った．この手法を利用することで，今まで測定機座標系における不確かさ評価しか行われていなかったのに対して，寸法測定やワーク座標系における不確かさ評価が可能となった．また，寸法測定における最大許容不確かさを導く方法も明らかにした．その結果以下のことを示した．

(1)　座標測定機の校正後の不確かさ評価手法を定式化した．

(2)　この計算手法により，座標測定機の寸法測定，ワーク座標系における不確かさを推定する理論的な手法を確立できた．

(3)　第 1 報を含めて，座標測定機を校正し，その後の不確かさの評価を一貫して行う方法を定式化した．

この手法を実際の測定作業に適用するためには，複雑な測定戦略における座標測定へ手法を拡張することと，本論文では考慮していない温度などの環境や，測定物の影響などによる不確かさ推定を追加することが必要である．

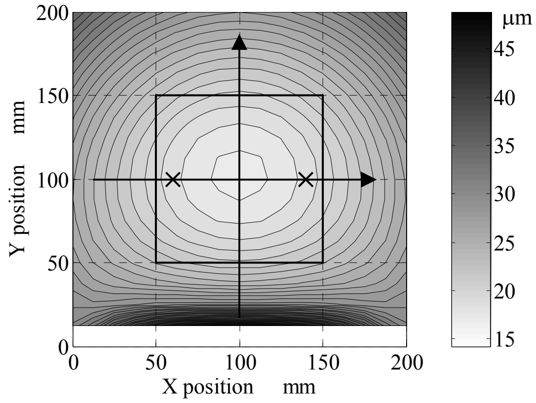


Fig. 6　Position uncertainties in the work coordinate system by two points at (60, 100) and (140, 100)

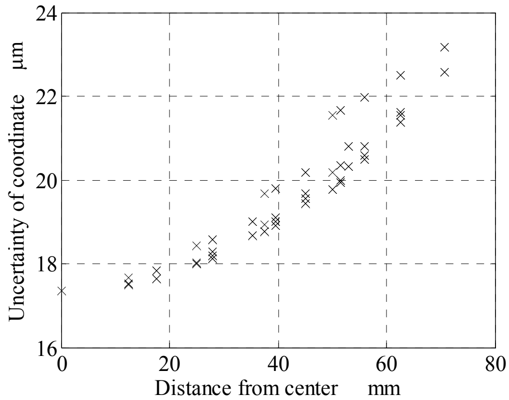


Fig. 7　Relationship between distances from the center and position uncertainties in the work coordinate system by two points at (60, 100) and (140, 100)

参 考 文 献

1)　高増潔，古谷涼秋，下嶋賢，佐藤理：座標測定機のアーティファクト校正（第 1 報）－運動学パラメータの校正－，精密工学会誌，**69**，6（2003）851.

2)　阿部誠，高増潔，大園成夫：空間座標の比較測定による CMM の校正（第 2 報）－パラメトリックエラー推定値の信頼性－，精密工学会誌，**66**，4（2000）578.

3)　G. Belforte et al.: Coordinate Measuring Machines and Machine Tools Selfcalibration and Error Correction, Ann. CIRP, **36**/1 (1987) 359.

4)　H. Kunzmann et al.: A Uniform Concept for Calibration, Acceptance Test and Periodic Inspection of Co-ordinate Measuring Machines Using Reference Objects, Ann. CIRP, **39**/1 (1990) 561.

5)　O. Sato, M. Hiraki, K. Takamasu and S. Ozono: Calibration of 2-DOF Parallel Mechanism, Initiatives of precision engineering at the beginning of a millennium, Kluwer Academic Publishers (2001) 734.

6)　小美濃武久，赤石庄平，石田一，鴨下隆志：多関節型三次元測定機の精度向上，精密工学会誌，**52**，8（1986）1300.

7)　高増潔，佐藤理，Chanin Sinlapeecheewa，下嶋賢，古谷涼秋：座標測定機のアーティファクト校正（第 2 報）－冗長座標測定機の自己校正－，精密工学会誌，**70**，5（2004）711.

8)　Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO, (1992).

9)　高増潔，古谷涼秋，大園成夫：座標計測における形体パラメータの信頼性，精密工学会誌，**63**，11（1997）1594.

10)　下嶋賢，古谷涼秋，大園成夫，高増潔，平木雅彦，荒木健司：3 次元測定機の不確かさ推定に関する研究（第 1 報）－多関節型 3 次元測定機の機構パラメータの算出と不確かさ推定－，精密工学会誌，**69**，6（2003）841.

11)　M. Abbe, K. Takamasu, S. Ozono: Reliability on calibration of CMM, Measurement **33**, 4 (2003) 359.

12)　中川徹，小柳義夫：最小二乗法による実験データ解析，東京大学出版会，(1982).