【報告】

三次元測定機におけるSN比を用いた不確かさ評価について

機械科　　柳原　亘　北川剛弘*　大澤洋文

Measurement uncertainty evaluation by signal-to-noise ratio method using CMM

Wataru Yanagihara,Takahiro Kitagawa and Hirohumi Oosawa

It was tried to evaluate measurement uncertainty by signal-to-noise ratio using CMM (Coordinate Measuring Machine). As a result, it has been cleared that measurement uncertainty is evaluable in manufacturing stage without the calibration value, because is evaluable even when there is no calibration value.This method is easier than the conventional method, and it is possible to evaluate uncertainty from the accumulated routine data by this method.Moreover, the main factor of uncertainty is cleared by evaluating signal-to-noise ratio of each error factor.

１．はじめに

近年、測定値の信頼性を表す用語として「不確かさ」という尺度が使われ始めている。不確かさとは、「真の値」が測定値に対してどの程度のばらつきの範囲内にあるのかを規則に従って算出したものである。

従来は、不確かさを算出するために、何通りもの測定を行い、解析にも手間が掛っていたため、製造現場では不確かさの評価が普及しておらず、簡便な不確かさ算出手法が求められていた。

今回、当センターの三次元測定機を用いて、「SN比」というばらつきの評価尺度を使い、より簡便な不確かさの算出を試みたので報告する。

２．SN比について

２．１　測定機の校正

寸法の異なる標準の真値をM_1、M_2、・・・、M_nとして、これを測定したときの測定機の指示値をy_1、y_2、・・・、y_nとすると、三次元測定機の示す指示値yは次のように一次式

$$y=\alpha+\beta M+e$$

で表すことができる（図１）。本式を変換すると、

$$M=\{(y-\alpha)/\beta\}-(e/\beta)$$

となる。ここで、右辺の第一項は測定機を校正した後の測定値、第二項は測定機を校正した後の誤差を表している。一般的に、測定機の校正とは、標準の真値Mを測定したときの測定機の指示値yの誤差変動が最小になるように一次式校正が行われたと仮定して回帰係数βを求め、測定機の指示値yから（$y-\alpha$）/βの計算によって真値Mの推定値$\hat{M}$を求めることである。したがって、測定の良否の判断に必要なのは指示値yの誤差eではなく、推定値$\hat{M}$の誤差e/βである。なお、第二項の逆数をとり、二乗をした値β^2/e^2が後述の２．２節で述べるSN比を表している。つまり、SN比を求めるということは、測定機に校正を施した後に得られる測定値の誤差を評価するということである。

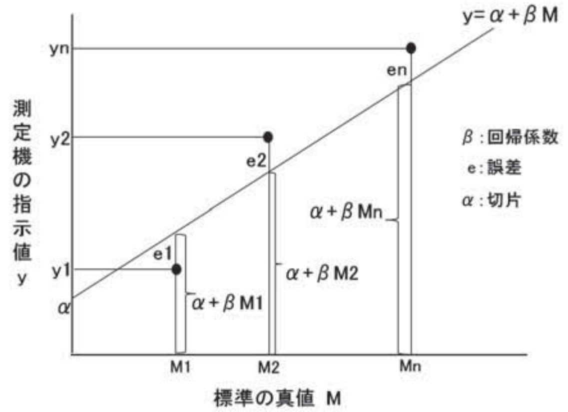

図１　標準の真値と測定機の指示値との関係

２．２　SN比の意義

SN比(η)は、感度（β^2）とばらつき（σ^2）の比で

*）現　静岡県工業技術研究所

表すことができる。そのため、感度（β^2）が大きく、ばらつき（σ^2）が小さければSN比は大きくなり、その測定は信頼性が高いことになる。図２に示すSN比と測定機の特性を事例にして考えてみる。①の場合は、β^2 が大きく、σ^2 が小さいために、SN比は大きくなる。②の場合は、β^2 が大きく、σ^2 も大きいため、外乱の影響を受け易いことを表している。③の場合は、σ^2 は小さいが、β^2 も小さいため、現象の微妙な変化を見逃し易いことを表している。最後の④の場合は、β^2 が小さく、σ^2 が大きいため、SN比は小さくなる。従って、SN比を用いれば、測定機の特性、測定法、測定環境等を含めた測定の良し悪しを総合的に判断することができる。

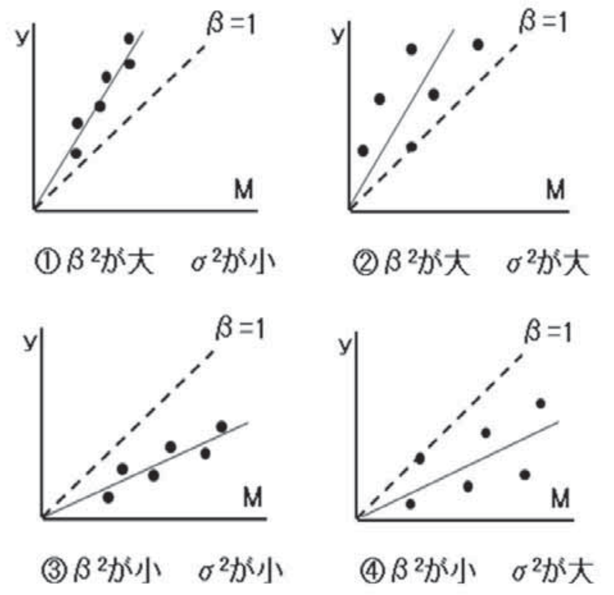

図２　SN比と測定機の特性

３．実験

３．１　測定対象物及び測定量

測定対象とした簡易検査ゲージを図３に、仕様を表１に示す。図３においてボール１を原点、ボール２をＸ軸上（正方向）、ボール８をXY平面上にあるとした右手座標系に対して、各ボールの中心座標値を測定した。そして、原点（ボール１）から各ボールまでの距離を算出し、測定量とした。

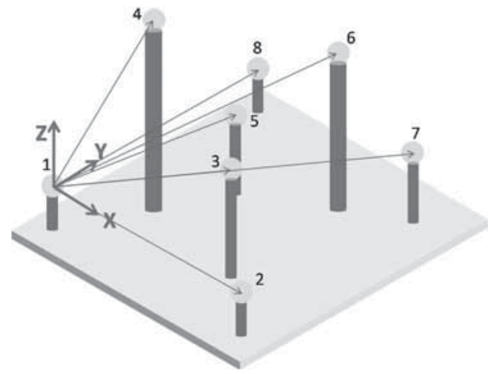

図３　簡易検査ゲージ

表１　簡易検査ゲージの仕様

産総研製簡易検査ゲージ※(シリアル番号:08AA7603)				
ベースサイズ	400×400mm			
XY基準面から各ボール中心までの呼び高さ(mm)	1: 0	2: 0	3: 150	4: 250
	5: 100	6: 200	7: 50	8: 0
各ボールの呼び球径	20mm			
20℃における熱膨張係数	$(0.00\pm0.02)\times10^{-6}$/K			

※産業技術総合研究所により、各ボールの中心座標には基準値が与えられている

３．２　測定環境

測定は20±１℃の恒温室で行った。

３．３　使用機器

測定に使用した三次元測定機の外観を図４に、仕様を表２に示す。

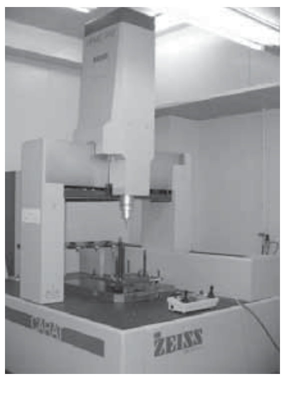

図４　三次元測定機

表２　三次元測定機の仕様

機器名	Zeiss 社製 UPMC 850 CARAT		
20℃における測定精度	1軸	0.5+L/900(μm)	
	空間	0.8+L/600(μm)	
測定範囲	X : 850mm	Y : 1200mm	Z : 600mm

【報告】

３．４　測定方法

SN比を用いた不確かさの評価には、従来のような多元配置実験は本来必要ないが、今回は測定値のばらつきに対して影響の大きな因子をSN比による手法により特定することが可能か調べるため、誤差因子を５種類、信号因子を１種類として、多元配置実験を行った。

誤差因子は、反復R、スタイラス径D、測定位置P、測定姿勢T、繰返しnとし、信号因子は測定距離Mとした。

反復Rは、日をおいた実験の繰返しであり、R1、R2、R3の３水準とした。

スタイラス径Dは、φ８mm（D1）とφ3mm（D2）の２水準とした。なお、φ８mmのスタイラスは測定圧を標準の0.2Nとし、φ３mmのスタイラスは剛性を考慮して測定圧を0.1Nとした。

測定位置Pは、図５のようにY軸スケール近く（P1）とY軸スケール遠く（P2）の２水準とした。

測定姿勢Tは、図６のようにボール１、２を手前に置いた姿勢（T1）と、そこから反時計回りに45°回転させた姿勢（T2）の２水準とした。

繰返しnは、連続した測定の繰返しであり、n1、n2の２水準とした。

測定距離Mは、原点（ボール１）と各ボール中心との空間的な距離であり、M_1からM_7の７水準となる。なお、M_1からM_7は、それぞれボール1-2、1-3、1-4、1-5、1-6、1-7、1-8間の距離を示す。

測定順序を図７に示す。なお、測定順序による系統誤差を少なくするため、スタイラス径D、測定位置P、測定姿勢Tについては、測定順序を無作為化した。

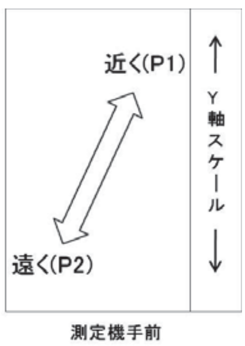

図５　測定位置P

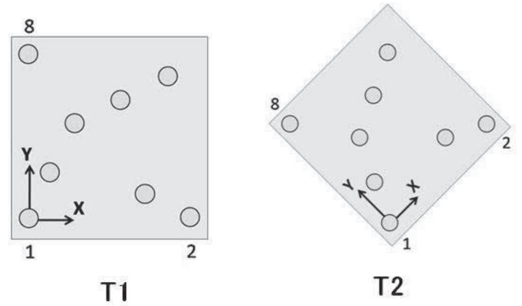

図６　測定姿勢T

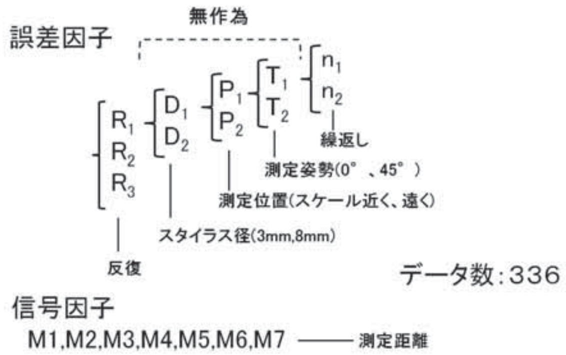

図７　測定順序

４．結果と考察

４．１　SN比の算出

測定で得られたデータを図８の形式でまとめる。列に信号因子である測定距離Mをとりデータを記入する。

実験番号 ＼ 信号因子	M_1	M_2	・・・	・・・	M_k
1	y_{11}	y_{21}	・・・	・・・	y_{k1}
2	y_{12}	y_{22}	・・・	・・・	y_{k2}
・・・	・・・	・・・			・・・
・・・	・・・	・・・			・・・
r	y_{1k}	y_{2r}	・・・	・・・	y_{kr}
合計	Y1	Y2	・・・	・・・	Yk

図８　測定データのまとめ方

SN比の算出法[1)]は、測定対象の基準値がある場合と基準値が無い場合とで異なる。今回使用した簡易検査ゲージは基準値が与えられており、どちらの算出法も使用できるため、それぞれの手法を用いてSN比を算出する。

基準値がある場合のSN比の算出結果を表３に、基準値が無い場合のSN比の算出結果を表４に示す。

表３　SN比算出結果（基準値がある場合）

数式	算出結果
有効除数：　$R=r\sum(M_i-M^{※1})^2$	1155430
全変動：　$S_T=\sum y_{ij}^2$	38022792
回帰変動：　$S_\beta=-\{\sum Y_i^{※2}(M_i-M)\}^2$	1155422
一般平均：　$S_m=-(\sum Y_i)^2$	36867370
誤差変動　$S_e=S_T-S_\beta-S_m$	0.000107644
誤差分散：　$V_e=S_e/(kr-2)$	3.22288E-07
SN比：　$\eta=\{(S_\beta-V_e)/R\}/V_e$	3102795

※1　$\bar{M}$：信号因子の基準値の平均値　　※2　$Y_i=\sum_{j=1}^{r} y_{ij}$

表４　SN比算出結果（基準値が無い場合）

数式	算出結果
有効除数：　$R=r\sum M_i^2-(\sum M_i)^2$	1155430
全変動：　$S_T=\sum y_{ij}^2-(\sum Y_i)^2$	1155422
水準間の変動：　$S_M=-\sum Y_i^2-(\sum Y_i)^2$	1155422
誤差変動：　$S_e=S_T-S_M$	3.39597E-05
誤差分散：　$V_e=S_e/k(r-1)$	1.03221E-07
SN比：　$\eta=[\{S_M-(k-1)V_e\}/R]/V_e$	9687872

※Mは、信号因子の基準値の代わりに設計値や測定データの平均値とする

４．２　不確かさの算出

４．１節で求めたSN比ηから不確かさを算出する。不確かさは標準偏差で表されており、SN比ηから標準偏差を求める簡易式は$3/\sqrt{(\eta)}$となる。この簡易式で求めた不確かさは包含係数K＝3（信頼水準99%）における拡張不確かさに相当する。

基準値がある場合における不確かさU_Aは、

$U_A=3/\sqrt{(3102795)}=0.0017\text{mm}$

$=\pm1.70\mu\text{m}$（K＝3）

となった。

つぎに、基準値が無い場合における不確かさU_Bは、

$U_B=3/\sqrt{(9687872)}=0.00096\text{mm}$

$=\pm0.96\mu\text{m}$（K＝3）

となった。

４．３　各誤差因子におけるSNの算出

４．１節で求めたSN比は全測定データから算出したものである。SN比は各誤差因子ごとに算出することもでき、一つの誤差因子の水準を固定して他の因子を変えることにより結果がどの程度ばらつくかを把握することができる。各誤差因子の水準ごとにSN比を算出した結果を図９、図10に示す。なお、図中のSN比は10を底とする対数をとり、10倍した値であり、単位はdBで表している。

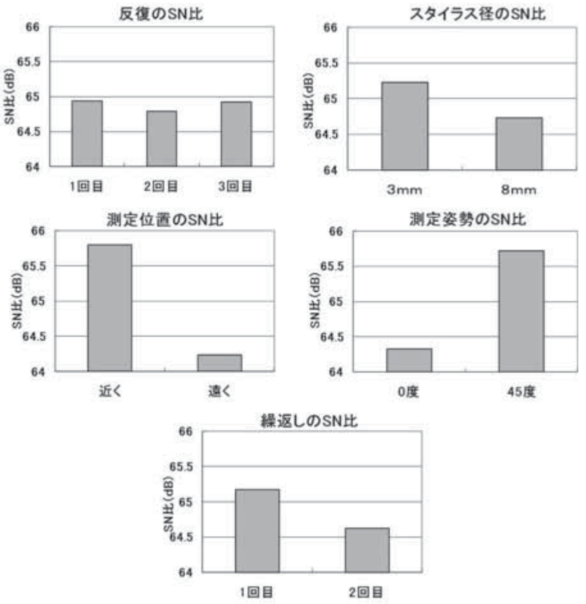

図９　各誤差因子におけるSN比（基準値がある場合）

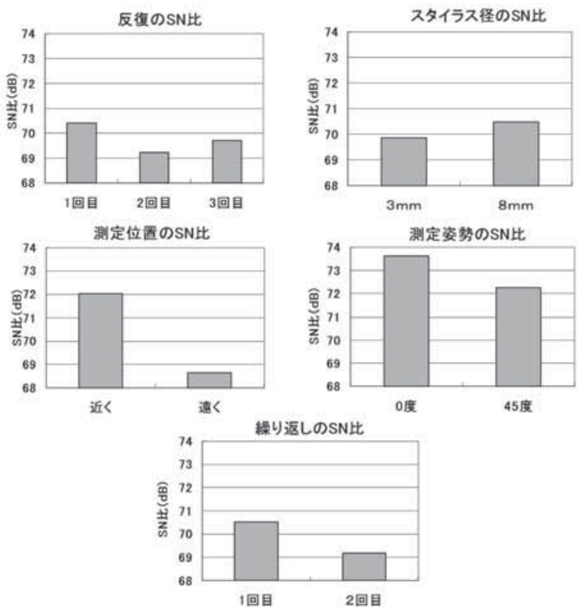

図10　各誤差因子におけるSN比（基準値が無い場合）

４．４　考察

不確かさについては、基準値がある場合における不確かさが、基準値が無い場合における不確かさよりも大きく算出された。これは、基準値測定後のゲージ運搬中にボールの位置がずれた可能性があること、及び、基準値測定時のゲージの支持方法が今回の実験における支持方法と異なることが判明しており、このためゲージが変形してボール位置がずれたことなどが原因として考えられる。

図９と図10より、水準間のSN比の差が大きい誤差因子が存在する。これは、その誤差因子が不確かさに影響する有意な因子であることを表していると推測される。これを検証するため実験データの分散分析[2)]を行った。２．１節で述べたとおり、SN比は校正後の測定値のばらつきを評価していることから、実験で得られたデータから回帰係数βを求め、校正後の測定値を算出する。そして、校正後の測定値から基準値を差し引いた偏差を分散分析した。結果を表５に示す。なお、基準値が無い場合は、信号因子が無く回帰係数を求めることができないため、校正後の測定値を算出することができない。図９と表５より、有意な要因が測定位置P、測定姿勢T、スタイラス径Dで一致している。よって、各誤差因子のSN比を算出することで、有意な誤差因子を把握することができると考えられる。

５．まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

⑴　SN比を用いた手法により、不確かさを算出した。

⑵　測定対象物の基準値が無い場合でも不確かさを算出することができ、基準値が不明な場合が多い製造現場でも不確かさを求めることができる。

⑶　測定値をばらつかせる誤差因子を設定し多元配置実験を行えば、各誤差因子のSN比を算出することができ、有意な誤差因子を把握することができる。

SN比は数種類の信号水準があれば算出できるため、今回のように多元配置実験を行わなくても、日々蓄積されたデータからもSN比を求め不確かさを算出でき、日常的に不確かさを管理することができると考えられる。

今回の成果は、これまであまり普及しなかった製造現場における不確かさの管理の一助になると考えられるため、今後の成果の普及に努めていきたい。

謝辞

本研究における「SN比を用いた不確かさ評価」は長野県CDT研究所中村哲夫氏にご教示いただいたものです。実験から評価に至るまで貴重な助言をいただいた同氏に深く感謝します。

参考文献

１）矢野宏：『計測管理の実際』工業調査会、(1986)

２）田口玄一他：『経営工学シリーズ18　実験計画法』日本規格協会、(1979)

表５　分散分析表（基準値がある場合）

因子		二乗和	自由度	不偏分散	有意性	不偏分散の期待値
一般平均	m	0.00000000	1	0.00000000		$\sigma e^2+112\sigma R^2+168\sigma P^2+168\sigma T^2+168\sigma D^2+168\sigma n^2+48\sigma M^2+336\sigma m^2$
反復	R	0.37165287	2	0.18582644		$\sigma e^2+112\sigma R^2$
測定位置	P	1.75136194	1	1.75136194	**	$\sigma e^2+168\sigma P^2$
測定姿勢	T	1.26844710	1	1.26844710	**	$\sigma e^2+168\sigma T^2$
スタイラス径	D	0.56896886	1	0.56896886	*	$\sigma e^2+168\sigma D^2$
繰返し	n	0.05580599	1	0.05580599		$\sigma e^2+168\sigma n^2$
測定距離	M	73.68718685	6	12.28119781	**	$\sigma e^2+48\sigma M^2$
誤差	e	29.95078510	323	0.09272689		σe^2