

CNC三次元測定機を用いた非接触三次元形状測定機の精度評価

生産技術室 城之内 一茂, 花澤 明洋

Accuracy Evaluation of 3D Scanner Using Coordinate Measuring Machine

Kazushige JONOUCHI and Akihiro HANAZAWA

非接触三次元形状測定機は、三次元形状の取込みだけでなく、そのデータから各種要素計算が可能であり、利便性の高い機器である。しかし、可視光を用いた測定手法のため、表面性状によっては測定対象の表面に白色スプレーを吹くなどの前処理を必要とする。

本研究では、非接触三次元形状測定機の計測機としての精度を検討するため、新たに導入した三次元測定機を用い、表面処理の影響も含め評価を行った。その結果、表面処理の影響が支配的であることが示唆され、また測定可能な波長範囲も接触式倣い測定と同程度まで有していることがわかった。

1. はじめに

近年、射出成形品をはじめとする自由形状など、従来保有していた三次元測定機では測定できないものの評価・測定の相談が増え、非接触三次元形状測定機(以下 3D スキャナという)による三次元形状の取り込み・計測を行う機会が増えてきた。

このような中、当所の 3D スキャナは解析用ソフトウェアを無償で利用することができ、一度当所で三次元形状を取り込んでしまえば、そのデータを持ち帰り、自社での追加計測が可能であるなど、利便性の高い機器である。ただし青色の可視光を用いた測定手法のため、表面性状によっては測定対象の表面に透過・反射を防ぐ前処理を必要とする。しかし、表面処理にどの程度の誤差が含まれるかの見積もりは無く、取り込んだ三次元形状や、計算された数値は、利用者の判断としての使用にとどまっている。

本研究では、3D スキャナの利用者が求める精度に応えられるか等、利用者に提供すべき情報を取得することを目的とし、新たに導入した CNC 三次元測定機を用い、3D スキャナにより取り込んだ形状、そこから得られた計測値、また前処理による影響等の評価を行った。

2. 実験方法

2.1 表面処理の影響評価

表面処理手法として、当所で通常使用している浸透探傷用現像液、3D スキャナ用スプレー、酸化チタン粉末をエタノールに超音波分散したものを評価した。

測定はオプティカルフラットに表面処理を施した後一部処理剤をはがしたのを用い、CNC 三次元測定機の接触式プローブにより面補正を行ったのち、レーザープローブにより点群測定した。なお評価には外れ値を排除するため、中心φ50mmの範囲の点群データのうち、 1σ のデータ平均を厚みとした。

2.2 3D スキャナの測定位置による評価

3D スキャナの測定範囲内での位置による測定値のばらつきを、レーザープローブ用校正球の球半径を測定することにより評価した。レーザープローブ用校正球を用いるのは前処理を必要とせず、値がついており、またカメラとの相対位置による形状の影響を受けづらいためである。

2.3 カメラと測定対象の相対方向・重ね合わせ・張り合わせによる影響

3D スキャナは測定原理として2つのカメラを用い、その視差を用いて測定するため、一測定で測定できる範囲は限られる。このためターンテーブル上に測定対象を置き、影の無いよう何分割かに分け測定し、複数の測定データを重ね合わせ処理を行うことで、ひとつの三次元データを作成する。この時、測定対象とカメラの相対姿勢を推定するための参照点となるポイントシールを用いる。

またターンテーブルの回転だけでは撮像できない面に対しては、測定対象の姿勢を変え、複数の姿勢での測定データを張り合わせ、必要な個所の形状データを取得する。この際には測定対象にポイントシールを貼付し、これを基に処理を行う。

この測定原理から、円柱の様な方向を持つ形状を測定する際、2つのカメラの並び方向と試料との相対方向によって差が出る事が示唆される。また、重ね合わせによる測定精度への影響、張り合わせによる影響の評価のため、高精度円柱(三次元測定機校正用)、高精度ガラス球(真円度測定機校正用)及びリングゲージに表面処理を施したものをを用いて評価する。なお、今回は表面処理剤として浸透探傷用現像液を用い、先に評価した表面処理の影響についての検証も行うこととした。

2.4 自由曲面による波長特性

自由曲面を持つ評価試料を作成し、その断面曲線の波長特性を比較・評価を行う。評価断面形状は直線成分を持たず、また広くなだらかな特性をもつ微分ガウシアン形状とした。評価試料の作成には当所所有の切削式三次元モデリングマシン(MDX-540SA)を用い、前処理を必要としないケミカルウッドをφ5mmのエンドミルにて切削加工した。

測定条件として、CNC 三次元測定機ではスキヤニングプローブ (SP25M)にφ4×50mm スタイラスを用い、未知形状スキヤニングモードで倣い測定を行った。なお、φ4×50mm を用いたのは、最大許容スキヤニングプロービング誤差のメーカー保証スタイラスであるためである。

3D スキャナでの測定では、カメラ角度 45 度、ターンテーブルの分割数を 8(45 度ステップ)で取込みし、CNC 三次元測定機の倣い高さと同じ断面の曲線抽出を行った。

これらの測定データは等ピッチで無いため、線形補間により 0.01mm ピッチのデータとし、これに JIS B 0634 の位相補償フィルタ($\lambda c=2.5\text{mm}$, $Lc=0.8$)をかけたものをを用いて評価することとした。この時、 $\pm 3.75\sigma$ の点を用いて回転補正係数及び高さ補正係数を算出し、この時のゼロクロス点が基準原点となるよう元データを回転・移動補正したものを使用し、20000 点離散フーリエ変換により、波長特性への変換を行った。

2.5 モデルワークの測定比較評価

実測定での測定を模し、射出成型により制作されたモデルワークを測定・比較した。CNC 三次元測定機ではポイント測定とし、3D スキャナでは浸透探傷用現像液で表面処理後、カメラ角度 45 度、ターンテーブルの分割数を 8、2 姿勢の張り合わせ処理を行い、要素は 1σ の自動フィッティングにより作成することとした。

3. 結果及び考察

3.1 表面処理の影響評価

表面処理の影響評価を表 1 に示す。なお、3D スキャナ用スプレーは使用マニュアルのとおり、酸化チタン粉末は先行研究¹⁾を参考にエタノールに分散したものをエアブラシにより吹き付けた。

測定結果は分散分析²⁾を用い、塗布による不確かさと繰り返しの不確かさを分離した。また平均塗布厚に拡張不確かさ($k=2$)を足したものを上限厚として示している。なお、この値は著者が行った今回の実験における結果であり、あくまで参考値であることに注意を要する。

表 1 平均塗布厚と不確かさから求めた範囲

処理剤	塗布厚	不確かさ	上限厚 ($k=2$)
酸化チタン エタノール	0.0013	0.0021	0.006
3Dスキャナ用 スプレー	0.0034	0.0038	0.011
浸透探傷用 スプレー	0.0061	0.0049	0.016

3.2 3D スキャナの測定位置による評価

3D スキャナ自身の精度評価のため、3D スキャナの測定範囲中心 C からそれぞれ $\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$ に振り、測定空間内でレーザープローブ用校正球($R=15.0003\text{mm}$)を測定、前項と同様分散分析を用いて不確かさを求めた。なお、レンズ交換により複数の測定範囲を持つが、今回は通常用いているレンズである MV320(測定範囲 $X=320\text{mm}$, $Y=240\text{mm}$, $Z=200\text{mm}$)を用い、球の中心がおおよそ $X=\pm 145\text{mm}$, $Y=\pm 105\text{mm}$, $Z=-70/+130\text{mm}$ の位置で測定した。結果は測定位置による不確かさ 0.0023mm、繰り返しによる不確かさ 0.0010mm となり、前項の浸透探傷用スプレーでの不確かさと合わせた合成不確かさは 0.0055mm、これを考慮した上限厚($k=2$)は 0.017mm であり、約 0.001mm の影響にとどまった。

3.3 カメラと測定対象の相対方向・重ね合わせ・張り合わせによる影響

3.3.1 カメラと測定対象の相対方向・重ね合わせの評価

方向性をもつ測定対象(CNC 三次元測定機での測定値 22.001mm の円筒)を、写真 1 のとおりカメラ角度 90 度(鉛直下向き・カメラ内センサ読み値)に配置し、重ね合わせを行わない 8 の相対角度(方向

としては3方向)及び8重ね合わせを行った値の評価を行った(表2)。この結果から、2つのカメラの並び方向と試料との相対方向によって影響があることがわかった。ただし、どの測定値も前処理を含めた上限厚の範囲内には収まっている。

3.3.2 重ね合わせの評価

方向性の無い測定対象(CNC三次元測定機での測定値 25.392mm の高精度ガラス球)をターンテーブルに置き、45度ステップで回転(8重ね合わせ)して測定を行った。このとき、カメラ角度は90度及び45度の2姿勢での評価を行った(表3)。

なお、各カメラ角度での8重ね合わせカラーマップ(図1)から、カメラ角度による測定範囲の違いは見られないが、測定結果からカメラ角度90度では重ね合わせ無しの値と変わらず、重ね合わせによる測定精度の向上は見られない。このことから、多数の角度から測定されるカメラ角度が測定精度の向上に貢献することが示唆された。ただし、測定値に関しては前処理を含めた上限厚の範囲内に収まっている。

3.3.3 重ね合わせ・貼り合わせの評価

呼び径 25, 50, 75mm のリングゲージに前処理を施し、カメラ角度 45度, 45度ステップの8重ね合わせで測定を行った(写真2)。

平置きでの測定値(表4)に関して、測定面はいずれの呼び径も全周計測できており、誤差も前処理上限厚に収まっている。

縦置きでの測定値(表5)の「影あり」は測定面の下側しか計測できていない状態である。「天地張り合わせ」は天地回転させた2姿勢での計測を、測定対象に貼付したポイントシールを使用して貼り付け処理を行っている。今回の測定では、いずれも前処理の影響範囲内に収まっているが、張り合わせ処理による誤差よりも、測定範囲の広がりが精度の改善に貢献する結果となった。

表2 カメラとの相対方向及び重ね合わせ

方向	角度	測定値			
縦	0, 180	22.010	22.009		
横	90, 270	22.027	22.024		
斜め	45, 135, 225, 315	22.015	22.014	22.012	22.013
8重ね合わせ		22.012			

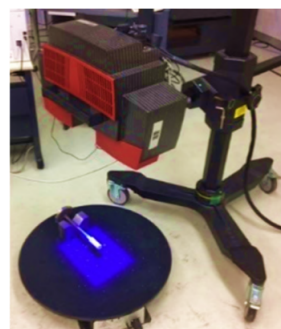
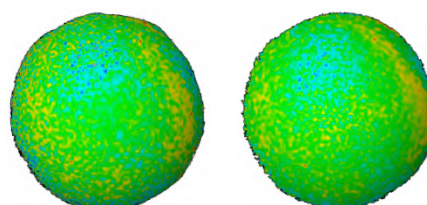


写真1 カメラ角度90度による測定

表3 重ね合わせの影響

重ね合わせ	カメラ角度	測定値	誤差
重ね合わせ無し (1ショット)	90	25.406	+0.014
	45	25.404	+0.012
8重ね合わせ	90	25.404	+0.012
	45	25.400	+0.008



カメラ角度45度 カメラ角度90度

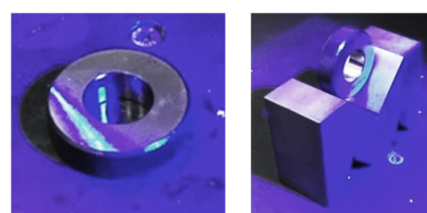
図1 重ね合わせの影響(8重ね合わせ)

表4 リングゲージの測定(平置き)

呼び径	校正值	測定値	誤差
75mm	74.9990	74.9899	-0.009
50mm	50.0005	49.9864	-0.014
25mm	24.9990	24.9877	-0.011

表5 リングゲージの測定(縦置き)

測定姿勢・張り合わせ		測定値	誤差
平面置き		24.9877	-0.011
縦置き	影あり	24.9715	-0.028
	天地貼り合せ	24.9857	-0.013



平置き 縦置き

写真2 リングゲージの測定

3.4 自由曲面による波長特性

図2に波長特性を示す。波長12mm以下で計算値との乖離があるが、これはφ5mmのエンドミルでは図3とおおり、凹側曲面の切削ができなかったためである。

フィルタ処理後の波長特性を比較すると、CNC三次元測定機と3Dスキャナとで良好な相関を示している。データを詳しく比較すると、波長約12mmにおいて0.0024mmの差が最大であった。これは図3のとおり、CNC三次元測定機における測定点密度が薄く、特にエンドミルのパスが十分なめらかではないと思われる個所で断面曲線の取得ができなかった影響と思われる。

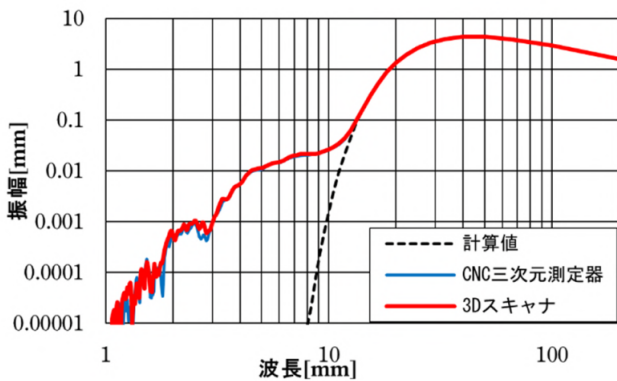


図2 波長特性

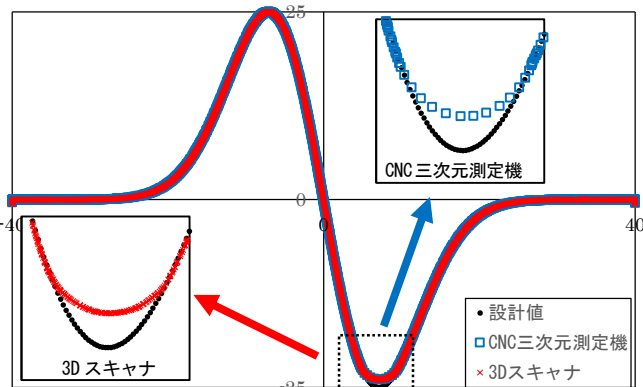


図3 測定密度の比較(補正無し)

3.5 モデルワークの測定比較評価

図4に示す位置の測定結果を表7に示す。測定結果中、特に差の大きい「上面円筒2」及び「上面円筒3」について再検討を行った(図5に当該円筒のフィッティング円筒とのカラーマップを示す)。

ここで測定手法として3Dスキャナはフィッティング円筒なのに対し、CNC三次元測定機では測定エリアの狭さから円としての測定(8ポイント測定・測定断面は図5中の横ライン)である。そこで、3D

スキャナでも同測定断面の作るフィッティング円として再評価を行ったところ、表6のとおり、改善がみられた。このことは、特に加工精度の悪い測定対象では、測定計画による差が大きく出る事を示すものである。

また3Dスキャナでの測定に於いては、測定対象の拘束について考慮する必要がある(図6に拘束の有無による測定対象の変形をカラーマップで示す)。通常、CNC三次元測定機では測定定盤面に測定対象を拘束し測定するが、3Dスキャナではその必要がない。このことは、測定対象の拘束・非拘束状態の要求等、求める状態での測定が必要であることを示し、測定計画の重要性を示すものである。

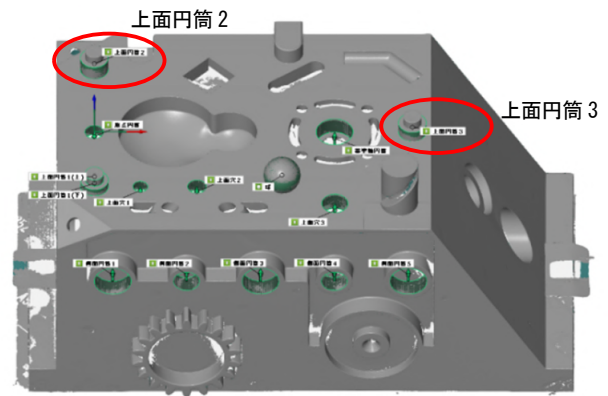
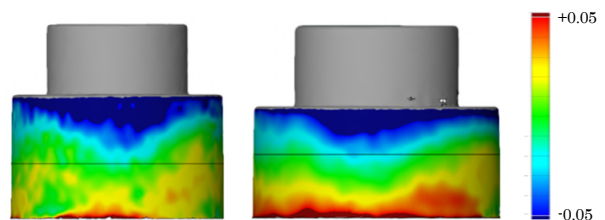


図4 測定要素



上面円筒2 上面円筒3
図5 円筒カラーマップ

表6 測定結果の改善

測定箇所		三次元測定機	3Dスキャナ 円筒評価	3Dスキャナ 断面円筒評価
上面円筒2	∅	15.033	14.999 (-0.034)	15.024 (-0.009)
上面円筒3	X	171.790	171.760 (-0.030)	171.776 (-0.014)
	Y	0.070	0.099 (+0.029)	0.074 (+0.004)

(上段は測定値, 下段()内は三次元測定機の測定値との差)

表7 測定結果

		三次元測定機	3D スキャナ	差
原点円筒	Ø	10.018	10.029	0.011
原点・基準軸円筒	L	129.763	129.765	0.002
基準軸円筒	Ø	19.822	19.842	0.021
球 1	Ø	19.927	19.920	-0.007
	X	101.410	101.394	-0.016
	Y	-41.879	-41.872	0.008
	Z	8.705	8.694	-0.011
上面円筒 1(下)	Ø	14.981	14.988	0.007
	X	0.099	0.101	0.002
	Y	-41.910	-41.896	0.015
上面円筒 1(上)	Ø	9.995	9.992	-0.004
	X	0.121	0.114	-0.006
	Y	-41.899	-41.887	0.012
上面円筒 2	Ø	15.033	14.999	-0.034
	X	0.025	0.038	0.013
	Y	47.929	47.916	-0.013
上面円筒 3	Ø	14.998	14.981	-0.018
	X	171.790	171.760	-0.030
	Y	0.070	0.099	0.029
上面 1	Ø	8.029	8.034	0.006
	X	24.916	24.923	0.007
	Y	-41.959	-41.945	0.014
上面 2	Ø	10.023	10.033	0.010
	X	55.446	55.447	0.001
	Y	-41.863	-41.855	0.008
上面穴 3	Ø	14.009	14.017	0.007
	X	129.910	129.903	-0.007
	Y	-54.835	-54.843	-0.008
側面円筒 1	Ø	19.828	19.838	0.010
	X	9.972	9.994	0.022
	Z	-39.889	-39.908	-0.019
側面円筒 2	Ø	13.988	13.984	-0.004
	X	49.857	49.876	0.019
	Z	-39.966	-39.975	-0.010
側面円筒 3	Ø	19.851	19.852	0.001
	X	89.775	89.783	0.008
	Z	-39.988	-39.989	-0.001
側面円筒 4	Ø	13.993	13.999	0.006
	X	129.660	129.664	0.003
	Z	-40.012	-39.998	0.013
側面円筒 5	Ø	19.857	19.859	0.002
	X	169.630	169.640	0.010
	Z	-40.015	-39.994	0.021

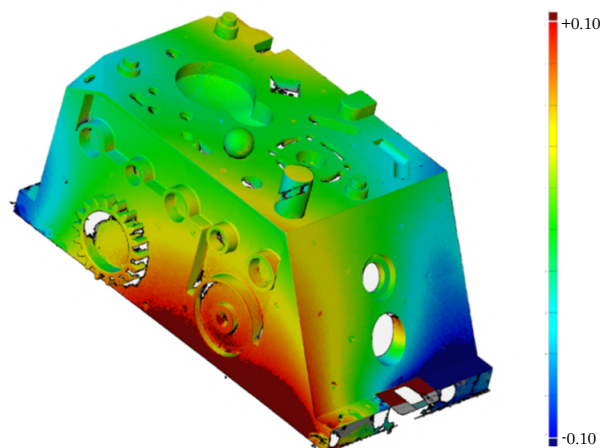


図6 拘束の影響(カラーマップ)

4. まとめ

3D スキャナは試料表面から直接点群を取得するため、特に接触式の測定機では取得することの難しい三次元自由曲面に強い特徴をもつ。それゆえ多様な評価手法がとれることから、特に形状精度の悪い試料を評価する場合、適切な手法を選ばないと他の測定機による評価と異なる結果となる。しかし前処理に注意し、拘束条件を含め適切な状態でスキャニングを行えば、十分計測に耐えうる精度を持つことがわかった。

なお、本研究に用いた非接触三次元形状測定機、切削式三次元モデリングマシン、CNC 三次元測定機は、公益財団法人 JKA 公設工業試験研究所等における機械設備拡充補助事業により整備した設備である。

参考文献

- 1) 清野若菜, 近野裕太, 矢内誠人, 夏井憲司, 緑川祐二: “三次元デジタイザによる寸法測定条件の最適化 (第2報)”, 令和元年度 福島県ハイテクプラザ 試験研究報告, pp. 83 - 86 (2020).
- 2) 城野克広: “分散分析を用いた不確かさ評価について”, 不確かさ Web 不確かさクラブ, <<https://unit.aist.go.jp/riem/ds-rg/uncertainty/club/ANOVA.pdf>> (参照日 2023 年 12 月 18 日).