

マシニングセンタにおけるタッチプローブを用いた 機上計測の基礎的研究

院生 A (M2) 指導教員：井原之敏

Fundamental Study of the On-Machine Measurements in the Machining Center with Touch Trigger Probes

Graduate student A

1 緒言

機械加工したワークピース（以下ワーク）を使用した機械上でそのまま精度を計測する作業を機上計測という。古くから行われている機上計測は顕微鏡付の研削盤、ジグボーラによる機上寸法計測や投影機付プロファイル研削盤が知られている。

マシニングセンタやターニングセンタなどの機械加工においてワークの設置・ワークの位置・形状把握など機上においての計測が工数の削減や高精度化に寄与している。しかし機上計測にも測定誤差があり、この誤差が出来上がった製品の形状誤差へ影響を与えることとなる。機上計測において計測精度に影響を与える誤差は2つに大きく分けられる。1つは加工機本体側がもつ誤差、もう一つは測定子がもつ誤差である。

加工機本体側が持つ誤差には位置決め・繰り返し精度や真直度・直角度に代表されるような幾何的な誤差などがあげられる。これらの誤差要因に関しては工作機本体の精度検査方法や、またそれらに対する空間誤差補正等の補正技術も開発・研究され明らかになってきている。

機上計測で最もよく使われている測定子はタッチトリガプローブである。タッチトリガプローブが持つ誤差にはタッチトリガプローブ特有の方向特性、繰り返し精度、接触時のスタイラスのたわみなどがある。

本研究では現在市場で入手できる主要なプローブ数機種において測定結果の比較を行った。測定ソフトウェアには最近開発された機上計測専用の、NCプログラムを自動的に生成するものを使用した。それらにより、上述の誤差を明らかにし、その上でより有効に計測する方法を検討した。

2 タッチトリガプローブの基本構造と検出原理

表1に本研究で使用した機器の一覧を示す。

表1 使用機器一覧

種類	品名	メーカー名
工作機	NMV5000DCG	森精機製作所
タッチプローブ	OMP60	RENISHAW
	TS640	HEIDENHAIN
	TS740	HEIDENHAIN
計測ソフト	Form control	Blum

タッチトリガプローブは本体から出ている測定子（

下スタイラス）がワークに接触し、傾斜することで信号を出力する装置である。構造は大きく分けると検出部が入っているプローブ本体（ハウジング）とスタイラス及びスタイラスの支持機構部に分けられる。最も基本的で一般的な支持機構は3点支持機構である。図1にその模式図を示す。3点支持機構は本体側に2個1対の3組のピンを持ち、その上にスタイラスセンタのピンを支える構造となっている。また、スタイラスセンタ上部よりスプリングによって一定の圧力を印加することで、スタイラスがワークから離れる際に、スタイラスセンタは常に高い精度を持って元の位置に復帰させる構造となっている。

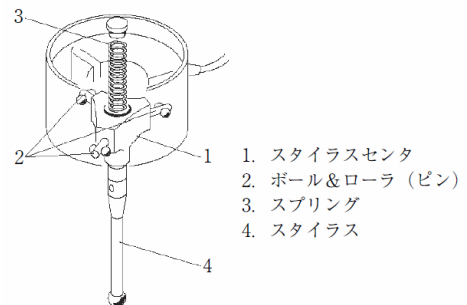


図1 3点支持構造の模式図⁵⁾

今回使用したタッチトリガプローブのワークへの接触判定方法は電気接点方式（OMP60）・光学センサ方式（TS630）・圧力センサ方式（TS740）となっている。電気接点方式は図1の3点支持の支持方法のピン部分に電気を流しておき、スタイラスが傾き接点が離れると電流が途絶える。それを検知して信号を出力する方法である。

光学センサ方式はスタイラスがワークに接触するとスタイラスセンタが傾き、スタイラスに取り付けられているレンズが傾くことにより焦点位置が動く。その動きを差動式受光部によりトリガ信号を生成し出力する方法である。図2に光学センサ方式の模式図を示す。

電気接点方式、光学センサ方式は検出部の移動した距離を元にトリガ信号を生成しているのに対し、圧電素子方式は支持点の下に圧力センサを配置することでスタイラスに加わる力の変化を元にトリガ信号を生成している。全方位にわたって低くかつ安定した測定圧で測定を行える。図3に圧力センサ方式の模式図を示す。

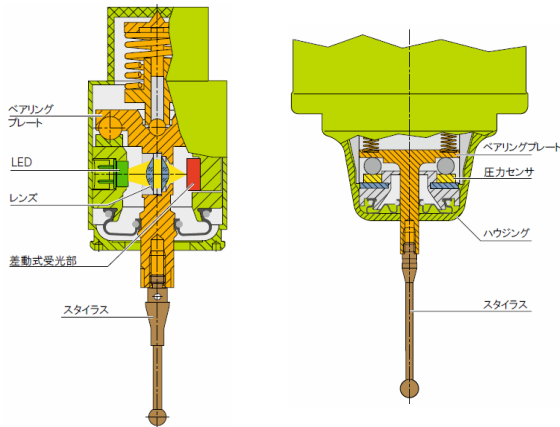


図2 光学センサ方式¹⁾

図3 圧力センサ方式¹⁾

3 タッチトリガプローブの持つ誤差

3点支持方式はタッチトリガプローブのスタイラスを安定・静定させるのに適した構造の1つであるといえるが、力を加える方向により測定に必要な力、すなわちスタイラスの移動距離が変わってしまい誤差要因の一つとなっている。この性質がタッチプローブの方向特性といわれている。また近年、この方向特性を極力抑えるため、ストレインゲージや圧力センサを利用したタッチプローブが開発されている。

タッチプローブはスタイラスがワークに接触したのちある一定の距離を動いてから信号が出力される仕組みになっている。また、信号が出力されたのち、制御側が認識するまでの電気的な遅延、スタイラスのたわみもわずかながら存在している。これらがタッチプローブのプリトラベル量と呼ばれるものである。内径を計測する場合には径が大きくなる方向に、外径を計測する場合には径が小さくなる方向にオフセットしてしまう。このオフセット量はスタイラスをワークに近づけていく速度（以下アプローチ速度）によって変化していくことが知られている。プリトラベル量の補正は一般的にリングゲージなどを用いてNCマクロプログラムによって自動的に行われている。補正を行うには再現性がよくなければならないため、繰り返し精度も重要となる。以下にタッチプローブの誤差要因をまとめる。

- ・繰り返し精度
- ・方向特性
- ・プリトラベル量
- ・アプローチ速度の安定性

4 キャリブレーション

プリトラベル量と方向特性はキャリブレーションを行うことで補正できる。キャリブレーション（校正）とは、寸法の保証されたものなどの既知の寸法のもをタッチトリガプローブで測り、その結果と基準となる寸法とのずれを関連付けることを言う。タッチトリガプローブのキャリブレーションの方法はリングゲージを用いた方法と基準球を用いた方法を通常用いる。

リングゲージを用いた校正方法は、工作機に用意されている補正用のNCマクロプログラムを使い、リングゲージなどの内径の3点もしくは4点を測り、その結果から±X軸送り・±Y軸送りのプリトラベル量、主軸中心とスタイラス先端球の中心のオフセット距離を補正する方法である。この方法はデータミングとも呼ばれている。また、ブロックゲージなどを計測し、-Z軸送りのプリトラベル量を補正するNCマクロプログラムも用意されている工作機械もある。これらの方法で得た補正量は、NCマクロプログラムを用いた自動計測時に使用される。

基準球を用いた校正方法は工作機には用意されておらず、主に机上計測用ソフトウェアを用いて行われることとなる。今回はBLUM社のForm Control V4を使用し、校正を行った。この校正方法は、基準球をさまざまな角度から測定し、基準球に沿った3次元的な半径方向の誤差マップを作り、そのアプローチ角度ごとに補正量が決定される。実際に測定したアプローチ角以外の測定方向は補間により補正量が決定される。また、今回使用したソフトウェアには線形補間が使われている。これにより、方向特性についても補正されることとなる。図5に今回使用したソフトウェアにより定められた、校正時の測定点を示す。

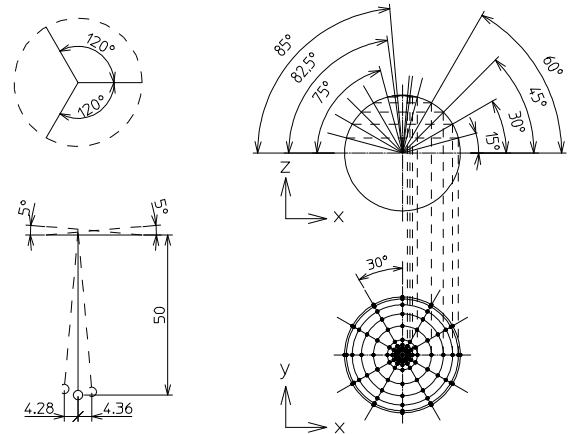


図4 方向特性の原理

図5 基準球を用いた校正の測定点

5 実験方法

5.1 方向特性確認実験

測定対象物を真球度0.05 μ mの保証された1inchの鋼球とし、図6の角度の定義に従って $\psi=10^\circ$ 毎、 $\theta=30^\circ$ 毎の合計109点の計測を行った。その際、アプローチ速度を100mm/minに、スタイラス接触時の速度を確実に安定させるため10mmのアプローチ距離を設けた。また、キャリブレーションの効果を確認するため、キャリブレーション前後で同じ計測を行い方向特性の補正具合を、JIS B 7440-2¹⁰⁾記載されている球の測定点を測ることで、球の半径方向のばらつきを補正具合をそれぞれ調べた。図7、図8にそれぞれの測定点を示す。

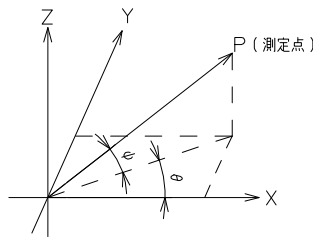


図 6 測定点指示時の角度 ψ と θ の定義

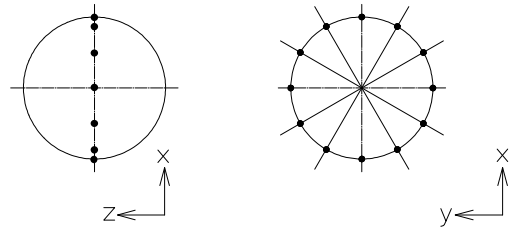


図 9 計測速度による影響実験の測定点

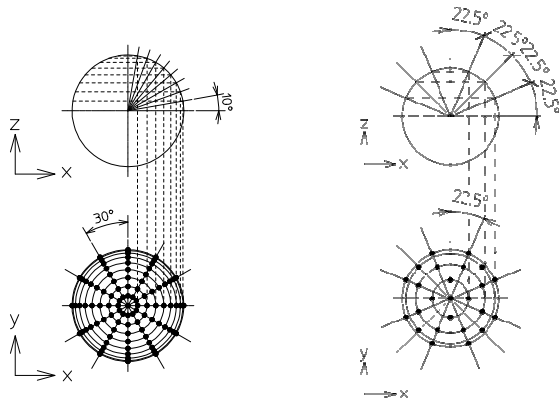


図 7 方向特性の測定点 図 8 JIS B 7440-2 測定点¹⁰⁾

5.2 繰り返し誤差

測定対象物を真球度 $0.05 \mu\text{m}$ の保証された 1inch の鋼球とし、図 6 の角度の定義に従って $\phi=45^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 毎に合計 17 ヶ所を 1 ヶ所につき 20 回ずつ連続して計測を行った。その際、アプローチ速度を $100\text{mm}/\text{min}$ に、スタイラス接触時の速度を確実に安定させるため 10mm のアプローチ距離を設けた。

評価方法として測定点毎に得られた誤差量の標準偏差を取り、その値をもとに比較した。

5.3 計測速度による影響

測定対象物を真球度 $0.05 \mu\text{m}$ の保証された 1inch の鋼球とし、図 6 の角度の定義に従って $\phi=0^\circ$ 、 $\theta=30^\circ$ 毎の合計 109 点の計測を行った。その際、アプローチ速度を $50\text{mm}/\text{min}$ より $50\text{mm}/\text{min}$ ずつアプローチ速度を増加させて $1500\text{mm}/\text{min}$ まで計測を行い、計測結果より最小二乗法を使用して半径を算出し、その推移を各タッチトリガプローブにおいて比較した。スタイラス接触時の速度を確実に安定させるためアプローチ時間を 1s に設定し、スピードに応じて約 $1\text{mm}\sim 25\text{mm}$ のアプローチ距離を設けた。比較の際、プローブ毎に $50\text{mm}/\text{min}$ で計測した半径を基準とし、その差異をプロットし傾向を比較した。

また、方向特性への影響も調べるため、方向特性確認実験で行った実験をアプローチ速度 $50\sim 250\text{mm}/\text{min}$ まで変化させて再度行った。図 9 に測定点を記載する。

5.4 機械の加減速性能確認

各実験で用いたアプローチ距離が適正かを調べるため、各軸の送り速度の加減速性能を計測した。指令速度は $50\text{mm}/\text{min}\sim 300\text{mm}/\text{min}$ まで $50\text{mm}/\text{min}$ 毎に変化させ、各軸単体を G01 指令にて動かした。また、実験は全軸ともストロークの中心付近で行った。実験機に使用されているリニアエンコーダの 1Vpp の SIN 波信号を制御機直前で分岐させ、デスクトップ PC に入力し HEIDENHAIN 社製の汎用 PC インターフェイスボード IK220 を介し、時間ごとの位置情報を記録した。位置情報の記録には HEIDENHAIN 社製のソフト"ACCOM"を使用したのだが、データのサンプリング開始トリガが一定距離を動いた時となるため、計測方向に 1mm 動かし、ドウェルをかけることによって静止状態からの加速を調べた。また、この動作を挟むことによってバックラッシュの影響も取り除くことができる。

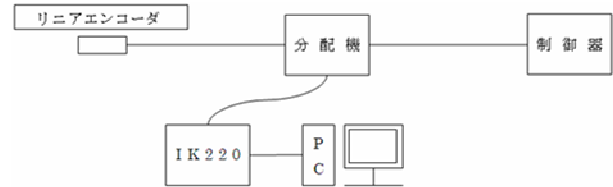


図 10 加減速性能確認実験配線図

5.5 3軸機能使用による計測

加工から機上計測の流れを実際に行った。計測物は JIS B 6336-7⁸⁾に記載されている工作物、JIS B 6336-7-A160 とした。図 11 にその形状を記載する。

本実験では $\phi 170\text{mm}$ の A2017 ブランク材より荒加工、仕上げ加工、機上計測の順で行った。計測の前には切削熱の影響を取り除くため、クランプを外さずに一晚の温度慣らしを行った。また、実際に JIS B 6336-7 の検査を行う場合は機上から取り外し CMM など使って測定を行うので、それを模して 1 度機上から取り外し、再度設置し直しての計測も行った。

測定には、測定直前に球によるキャリブレーションをかけた TS740 を使用し、アプローチ速度を $100\text{mm}/\text{min}$ 、アプローチ距離を 5mm として計測を行った。測定点は真直度に関しては約 10mm 毎に、真円度は 15° 毎に、円の中心が必要な場合は 45° 毎に、基準面は 1 辺 5 点で可能な限り大きく四角が取れるように設定した。図 12 に測定点を示す。

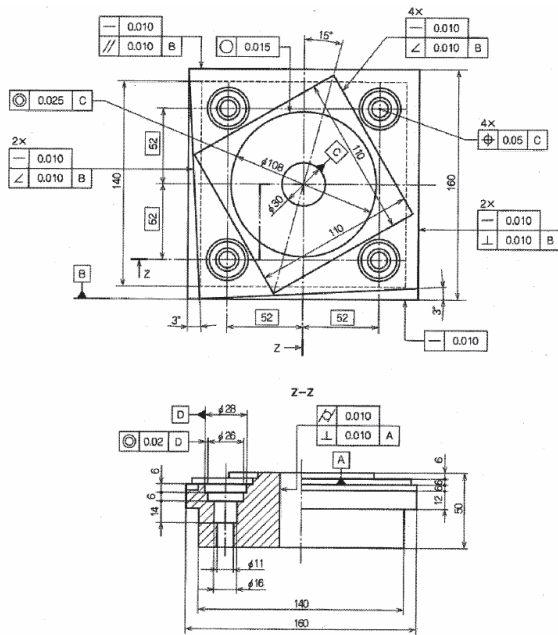


図 11 工作物 JIS B 6336-7-A160 の形状及び許容値⁹⁾

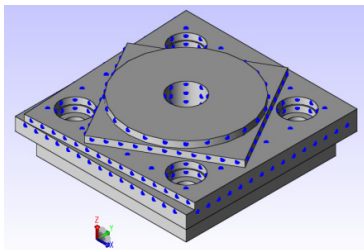


図 12 工作物 JIS B 6336-7-A160 の測定点

6 結果と考察

6.1 方向特性

図 13, 図 14 に計測結果例として OMP60 の方向特性と基準球によるキャリブレーションを行った後の方向特性を記載する。グラフは計測点を Z 軸+方向より見下ろした形となっており、見やすくするため $\psi=0^\circ$, 30° , 60° を抜き出した。水平軸が X 軸方向の誤差量を、垂直軸が Y 軸方向の誤差量を示している。また、誤差を可視化するため誤差量の 1000 倍を基準となる円に足し合せている。

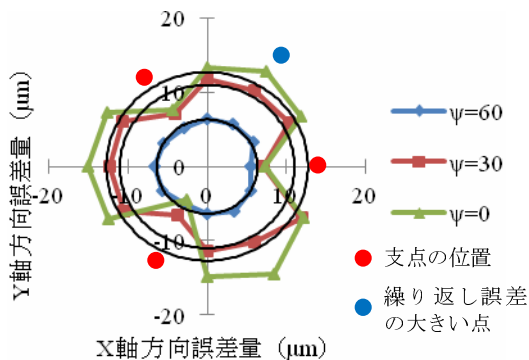


図 13 方向特性一例 (機種: OMP60)

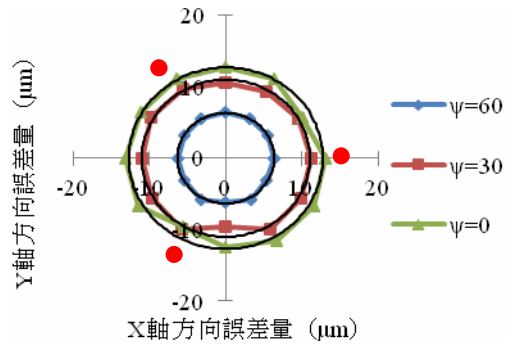


図 14 キャリブレーション後の方向特性一例 (機種: OMP60)

OMP60 と TS640 は三角形に近い方向特性を示していた。また、グラフ上の赤い点は支点のおおよその位置を示している。方向特性が支持方法による力を加える方向により測定に必要な力、すなわちスタイラスの移動距離が変わってしまうことが密接に関係していると考えられる。

キャリブレーション後は誤差の分布が円に近づき方向特性が改善されているのがわかる。多少のばらつきが残っているのは繰り返し誤差が要因だと考えられる。

次に球の半径方向の補正具合の一例を図 15 に示す。グラフは測定データそのものと、設置誤差による影響を補正したもの、キャリブレーション後に測定した結果を示す。X 軸は JIS B 7440-2 で決められている測定点 No. を、Y 軸は計測された球の半径を示す。

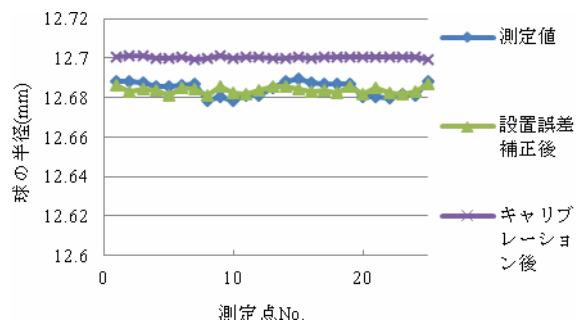


図 15 基準球の半径測定結果 (機種: OMP60)

キャリブレーション後のデータを見ると球の半径である 12.7mm 付近にデータが集まっているためキャリブレーションの効果は絶大なものと考えられる。しかし、若干のばらつきも残されている。これは繰り返し誤差によるものと、キャリブレーションによる誤差が含まれていると考えられる。キャリブレーション時の測定に使用しなかったアプローチ方向は線形補間によって補間されている。方向特性が歪な場合、補間による誤差が生まれてくる。また、キャリブレーションのデータはアプローチ角に関連付けられているため、タッチトリガプローブの主軸に対する回転方向をキャリブレーション時と一致させなければ誤差を増大させる要因となる。

6.2 繰り返し精度

今回の実験では機械がもつ繰り返し誤差の要因を除けていないことを考えると、すべてのタッチトリガプローブでも仕様値内で計測できていると考えられる。また、この試験を複数回行っているうちに時折、数 μm の繰り返し誤差を検出することがあった。仕様では 2σ 、すなわち95%の確率となっているためこれも仕様内だとは考えられる。繰り返し誤差の大きいアプローチ角度を抜粋して表2にまとめる。

表2 繰り返し精度確認実験結果(抜粋)

機種	標準偏差最大値			17点すべての標準偏差
	測定位置		標準偏差	
	Ψ	θ		
OMP60	45	45	0.95 μm	0.60 μm
TS640	45	135	0.47 μm	0.29 μm
TS740	0	0	0.48 μm	0.21 μm

すべてのタッチトリガプローブにおいて、支持点からあたるアプローチ方向で繰り返し精度が悪くなっていた。これは1つの支持点で他の支持点を持ち上げようとするため、不安定になっているのではないかと考えられる。また、不安定になっているためスタイラスがすべり、接触角が変わるといった現象も考えられる。

6.3 計測速度による影響確認の結果

アプローチ速度を変えても方向特性には概ね影響はなかった。多少のばらつきは見受けられたが、これは繰り返し誤差程度のものだといえる。

次にアプローチ速度を速くしていった場合のプリトラベル量の推移を図16に示す。グラフはX軸を計測時のアプローチ速度として、Y軸を50mm/min時に計測された半径を基準とした半径方向の誤差量として示している。また、TS740は仕様により250mm/minまでの測定とした。

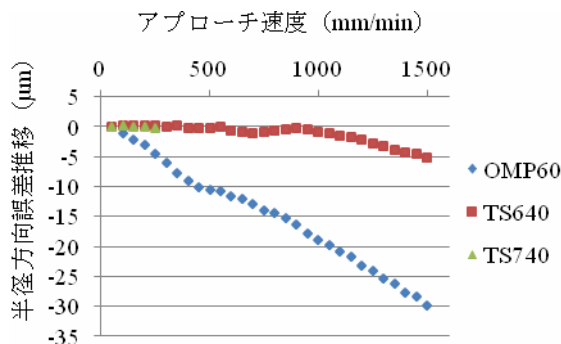


図16 アプローチ速度によるプリトラベル量の推移

各タッチトリガプローブにおいて、傾きに多少の違いはあるものの、速度に比例して測定半径が小さくなって

いるのがわかる。傾向が線形であることから、タッチトリガプローブがトリガ信号を出力してから制御機が受け取り、座標値を確定するまでの電気的な遅れが大きな原因であると考えられる。グラフより電気的な遅れ時間を計算してみるとOMP60は約1.2ms、TS640は約180 μs 、TS740は約100 μs となった。

6.4 機械の加減速性能

例としてY軸の測定結果を図17に示す。グラフはX軸に経過時間を、Y軸にその時間における速度を表している。

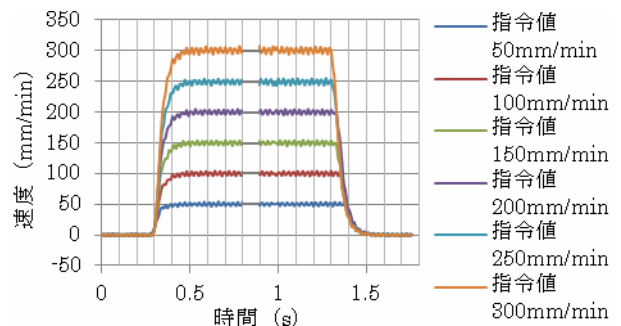


図17 Y軸の加減速性能

当然ではあるがXYZ軸すべて同様の加減速制御がされていた。また、50mm/minから300mm/minの範囲での加速に必要な時間はおよそ0.2s、減速に必要な時間は約0.2sだということがわかる。また、この実験は指令値5000mm/minでも行ったが、その加速時間は約0.3s、減速時間は約0.35sであった。図16より、接触時の速度が一定でないと誤差につながるということがわかっているため、加速時間と速度静定時間は計測には使えないということがわかる。また、減速時間は停止指示が出てからの軸の移動距離に置き換えることができる。この移動距離がタッチプローブの可動距離を超えないように速度を選定しなければならないことがわかる。以上より機械の加減速性能を調べることによりアプローチ距離・アプローチ速度の最適化ができると考えられる。

6.5 3軸機能使用による計測

表3に測定結果一覧を示す。表3の*1で示している数値は、機械主軸からのオイルドロップが原因で測定結果が悪くなっている箇所である。*2で示している数値はボーリング加工の不慣れにより、実際に加工精度が悪くなっていると考えられる。4つの中ぐりの位置度等の加工直後と再設置後の差は、設置誤差が原因であると思われる。

次に機械設置時の測定データよりタッチトリガプローブでの測定結果のほうが全般的に誤差が小さくなっていることが目につく。これはやはり計測時の座標系を機械座標系に依存していることが原因であると考えられる。この問題の改善方法として、機上にて計測されたワーク

を1度CMMで測定し、そのデータを校正データとして扱い、機上計測でのデータが比較データと大きく変わらないことを監視することで、計測データの信頼性を上げるといったことが必要となってくる。

表3 JIS B 6336-7-A160 形状測定結果

検査事項		加工直後 測定値 (μm)	再設置後 測定値 (μm)	許容値 (μm)	機械 設置時 (μm)		
中心穴	円筒度	12.5 *2	11.8 *2	10	0.5		
	基準面との直角度	0.7	1.2	10	5.9		
正方形	各側面の 真直度	1	1.1	1.4	10	6	
		2	1.8	2.3			
		3	1.1	0			
		4	1.4	1.8			
	基準面Bに 対する直角度	1	1.5	1.4	10	4.8	
		3	2.2	2.4			
基準面Bに対する平行度		2.2	2.2	10	6.1		
ひし形	各側面の 真直度	1	1.4	1.8	10	3.6	
		2	0.6	1.4			
		3	1.6	4.3			
		4	7.7 *1	2			
	基準面Bに対する傾斜度	1	1.8	1.8	10	1.2	
		2	0.9	1.5			
		3	1.8	10.8 *1			
		4	9.4 *1	2			
	円	真円度	5.8	29.1 *1	15	5.5	
		基準穴Cに対する同心度	2.6	4.6	25	3.7	
緩斜面	各面の真直度	1	2.3	3.8	10	6.9	
		2	2	3			
	基準面Bに対する傾斜度	1	2.7	4.8	10	6.2	
		2	2.8	4.3			
4つの 中ぐり	基準穴Cに対する位置度	穴26	1	1.3	6.3	50	11.5
			2	1.5	4.1		
			3	0.5	4.1		
			4	6	5		
		穴28	1	1.5	3.3	50	
			2	1.5	3.3		
			3	1	2.7		
			4	0.6	3.3		
	各位置の同心度	1	1.6	3	20	5.1	
		2	1.3	1.2			
		3	1.3	2			
		4	5.9 *1	2			

7 結 言

本研究では数種のタッチトリガプローブを用い、その特性を確認することで、タッチトリガプローブが機上計測に与える影響を確認した。その結果を以下にまとめる。

- タッチトリガプローブでの計測には3次元的な方向性を持っていることが方向特性確認実験の結果によりわかる。また、この方向特性は計測ソフトウェアを用いたキャリブレーションによって改善できるが、アプローチする角度に関連付けられているため、キャリブレーション時と同じ主軸回転位置にて使用しなければならないことがわかる。
- キャリブレーション時に測られていないアプローチ方向は測定点の誤差データによる線形補間によって補正量が決定されるため、方向特性が円に近ければ補間データによる誤差は小さくなるが、そうでない場合は補間による誤差が生まれてくる。このことより、自由形状を測定する場合はキャリブレーションを行うにしても方向特性が円に近いタッチトリガプローブを使用したほうが良いことがわかる。
- 計測時の速度はプリトラベル量に影響を及ぼすこ

とが実験によりわかった。このことより計測時の速度はキャリブレーション時と同じ速度に設定しなければならないことがわかる。また、計測速度による影響は再現性があり、その影響は速度に比例する傾向があることから、計測速度を変えても推量により誤差を減らせるのではないかと考えられる。

- タッチトリガプローブによる機上計測での計測時間は計測に要する移動距離とその移動速度により求められる。また、加減速性能を調べるとアプローチ距離と最大速度の最適化ができる。これにより計測精度を維持したまま計測時間を最短に設定することができる。
- 3軸機能による計測結果より工作機械の運動精度の影響はやはり無視できない要因であることが確認できた。CMMなどの測定方法と組み合わせを行い、適宜測定結果を校正することで信頼性を上げる必要があると考えられる。

参 考 文 献

- 井原之敏, 大塚裕俊, 工作機械の機上計測技術, 精密工学会誌 Vol.75, No.11(2009), pp1281-1284
- 武部隆, 工作機械用タッチプローブの計測技術, 精密工学会誌 Vol.75, No.11(2009), pp1273-1276
- 上野滋, 工作機械における機上計測技術, 精密工学会誌 Vol.75, No.11(2009), pp1269-1272
- 日刊工業新聞, 最新・インプロセス/オンマシン計測技術機械技術, 2010年4月号
- 大矢誠, タッチトリガプローブの精度に関する研究, 日本機械学会論文集(C編)59巻563号(1993-7), 論文 No.92-1462
- JIS B 0621:1984 幾何偏差の定義及び表示
- JIS B 0182:1993 工作機械—試験及び検査用語
- JIS B 6336-2:2002 (ISO 10792-2:2001) マシニングセンター検査条件—第2部: 立て形及び万能主軸頭をもつ機械の静的精度(垂直Z軸)
- JIS B 6336-7:2000 (ISO 10791-7:1998) マシニングセンター検査条件—第7部: 工作精度
- JIS B 7440-2:2003 (ISO 10360-2:2001) 製品の幾何特性仕様(GPS)—座標測定機(CMM)の受け入れ検査及び定期検査—第2部: 寸法測定
- 工作機械用タッチプローブ, HEIDENHAIN 社カタログ
- RENISHAW 社 HP: <http://www.renishaw.jp>