

進化する超精密加工機とその活用技術

Advanced ultra-precision machine tools and application

Akira AMANO
SHIBAURA MACHINE CO., LTD.

Abstract

For the ultra-precision machining center UVM series, which have been already widely used in machining dies/molds, for products that require fine finish and high precision, a high-rigidity and high-torque aerostatic bearing spindle that has higher load capacity and emphasizes the efficiency of rough machining has been made optionally available. Also a new image processing on-machine measuring instrument has been developed in order to enhance the on-machine measurement function, which realizes dimensional measurement of fine shapes that cannot be measured with a touch probe with remaining any scratch or damage on a finished surface. In addition, the operator support software “UVM-TAS” (TSA:Total Support Application), which achieves automation of various on-machine measurements, reduction of workpiece placing errors and tool-caused machining errors, tool life management based on the amount of tool wear, etc., has enabled the construction of a more advanced automation system, securing high-precision machining reproducibility as well as labor saving. Furthermore, a shape error correction system that performs high-precision on-machine measurement of the cutting edge contour shape error of a tool to correct cutter pass automatically in real time has been developed. This eliminates the need to modify 3D models for correcting machining errors and re-create NC data with CAM software, which removes the workload required for correction and greatly reduces the die/mold manufacturing time loss at the same time .

1. はじめに

小径エンドミルによる高速切削加工技術は、対象製品の高機能化や成形技術の進歩による金型の高精度化要求を背景に、加工機や切削工具の性能向上が図られ、目覚ましい発展を遂げている。切削加工は、加工機の運動特性がそのまま加工面に転写される加工手段である。このため、加工面精度や微細加工精度を高めるためには、運動精度に優れ、かつ低振動の特性を有する加工機が必要とされる。当社では、このような要求に応えるべく、レンズ金型用超精密加工機¹⁾で培った空気軸受技術やリアモータ駆動制御技術等を活用した、マシニングセンタ仕様の超精密加工機 UVM-450C を 2008 年に開発した。以後、顧客ニーズを反映させる形でシリーズ展開を図り、ミーリングによる種々の微細・精密金型製作の高精度化に貢献している。

昨今、対象製品の高機能化の波を受け、精密金型加工においては、微細化かつ高精度化の要求が日を追うごとに高まってきている。加工機や工具には、より高いレベルでの加工精度再現性が望まれるようになり、自動化や知能化の要求も大きい。そこで、本誌面では、UVM シリーズの最新の概要と高精度加工事例、そして、自動化と高精度化の双方をより高いレベルで志向した最新のオペレータ支援機能について紹介する。

2. 金型製造工程の課題

昨今、金型製造を取り巻く環境は、加工精度の向上だけでなく、コスト低減や製作リードタイム短縮の要求も、より大きくなっている。金型ミーリングにおける課題と要因について、キーワードを表 1 に記す。リードタイムについては、加工対象が比較的小さく、かつ使用する工具の種類や本数が増えるほど暖機運転の頻度が増すことなどから、非切削時間の低減が重要となる。また、人工工数の低減では、準備作業の自動化も必要とされてきている。一方、加工精度については、ばらつきを低減させることがポイントであり、加工機の

運動再現性確保と同時に工具の寿命管理も重要である。

表1 金型ミーリングにおける課題と要因

課題		主要因	具体要因
リードタイム	切削時間短縮	切削条件	加工機性能、工具性能
		加工パス	CAM機能、CAMスキル
	非切削時間短縮	加工パス	CAM機能、CAMスキル
		工具交換に伴う暖気運転時間	工具寿命、加工機性能
		機外計測補正	機上計測+補正機能
	段取時間短縮	ワークセッティング方法	
工数	準備作業自動化	ワーク、プログラム、工具選択	ATC、AWC、統合管理システム
	磨き、バリ取り工数低減	全体工程設定	素材、加工法選択
		切削仕上面精度	加工機性能、工具性能
加工精度	寸法、形状ばらつき低減	加工機の運動再現性	加工機性能、温度環境
		ワーク段取精度	チャック方法、AWCシステム
		工具寸法、工具輪郭形状	機上計測、工具寿命管理
	粗さ、表面性状ばらつき低減	加工機の運動再現性	加工機性能
		工具摩耗、工具個体差	工具性能、工具寿命管理

3. 超精密マシニングセンタ UVM シリーズの概要

3.1 加工機の特長

当社では、空気静圧軸受主軸を1990年代前半より高速ミーリング機に適用し、主軸回転速度の高速化による加工能率の向上を主眼とした高速加工機開発に取り組んできた。そして、高精度なリニアモータ駆動制御技術の適用で、2008年にミーリング機の送り精度を飛躍的に高精度化した本シリーズ起点機種 UVM-450C が開発された。図1に、超精密マシニングセンタ UVM シリーズ最新4機種の外観を示す。ワークテーブル作業面サイズ 450 mm×450mm の標準モデル 450C(H) から大形ワーク対応かつ自由度拡大のための多軸化を実現した直線3軸+回転2軸の5軸仕様機 700E(5AD)²⁾ まで、計4機種をラインナップしている。カバーデザインを統一すると同時に、段取等の作業性や操作性の一層の向上が図られている。

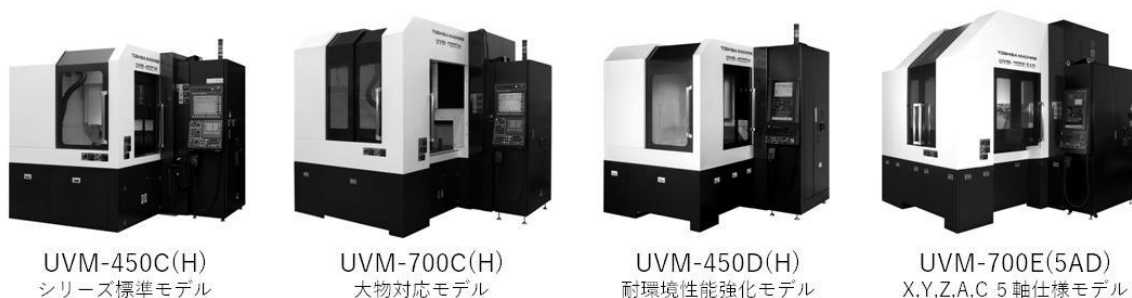


図1 超精密立形加工機 UVM シリーズ

直線軸の駆動には、全形式にコア付リニアモータが採用されている。最小設定単位は 0.01 μm (フィードバック単位は 0.5nm) であり、0.01 μm のステップも正確に制御可能なレベルにまで送り系の性能向上が図られ、高レスポンスで正確かつ円滑な動作特性が実現されている。

主軸には最高回転速度 60,000min⁻¹ の自社製空気静圧軸受主軸を標準搭載している。空気静圧軸受は、高速回転時においても転がり軸受では到達不可能な高い回転精度を得ることが可能な要素技術であり、回転毎の切削現象の安定化が図られるため、特に小径エンドミルの長寿命化に効果的である。また、発熱量が僅少で工具先端位置の熱変位量も僅か

である。すなわち、暖機運転時間の短縮が可能であって、工具交換に付随する非切削時間を大幅に低減することができる。

一方、空気静圧軸受主軸に対しては、負荷容量が小さいため適用範囲は仕上げ加工のみ、といった認識をされるケースがみられる。この認識は大きな誤解であって、前述の標準搭載主軸において、工具メーカーカタログ記載の加工条件数値に対し約2倍の加工能率となる切込み条件でも正常な加工が可能であり、精密金型の粗加工からの適用に支障はない。なお、負荷容量をより向上させて粗加工効率を重視した、高剛性・高トルク型の空気静圧軸受主軸の選択も可能としている。前述の標準搭載主軸に対し、軸受剛性を2倍、駆動トルクを3倍としており、汎用金型高能率な粗加工から超精密金型の鏡面仕上げ加工まで対応可能である。図2は、高剛性・高トルク型空気静圧軸受とその加工事例を示したものである。

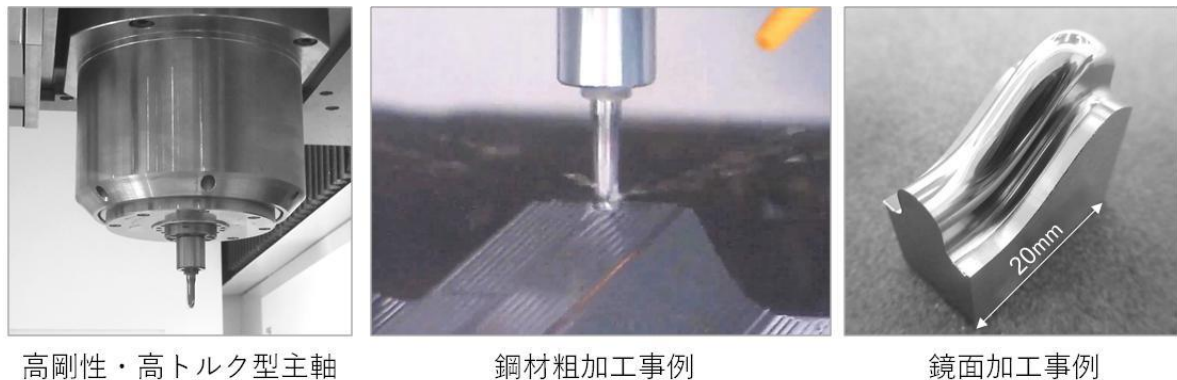


図2 高剛性・高トルク型主軸と加工事例

鋼材粗加工事例は、R2.5mm 超硬コーティングボールエンドミルを用いて調質鋼（40HRC）を加工している様子であって、加工条件は、送り速度3m/min、径方向切込み量1.75mm、軸方向切込み量1.0mmである。工具メーカーカタログ記載の加工条件数値に対し、3倍以上の加工能率となる設定数値であって、より高能率な条件での使用が可能である。鏡面加工事例は、cBN ボールエンドミルを用いて鞍形三次元形状（材質は52HRCの金型用ステンレス鋼）を鏡面仕上げした事例であって、Ra16nmの表面粗さが得られている。鏡面加工性能は従来同等であって、加工工程の高効率化かつ高精度化を実現している。

3.2 実用化されている微細形状金型の加工事例

UVMシリーズは、微細かつ高精度が求められる製品の金型加工において、既に広く利用されている。図3に自動車用光学部品用途の金型加工事例を示す。自動車光学部品の高機能化は著しく、照明用途において、微細形状パターンを配した製品も増加している。本事例は、自動車ヘッドランプにおいて帯状の照明部を配置するための導光体部分の金型加工事例を示したもので、三次元曲面に微細な鋸刃形状の溝列が配置されている。導光部全体の照度の均一化と高輝度特性の確保が必要とされるため、インコーナ部のR寸法極小化と、ばらつきのない高い表面粗さが面全体に要求される。本事例は金型用ステンレス鋼（52HRC）に対し、R0.05mmのcBNボールエンドミルを用い、5軸仕様のUVM-700E(5AD)によって加工されたものである。加工結果は、全体形状精度 $1.5\mu\text{m}$ 、表面粗さRa24nmであって、極小径工具を用いた5軸加工でも高い形状精度と表面粗さが実現されている。

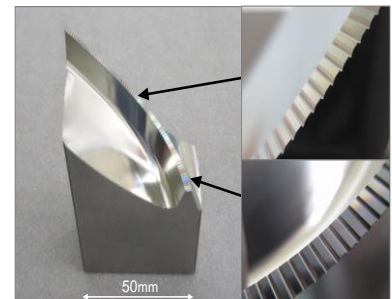


図3 導光体金型加工事例

4. オペレータを支援する付帯機能

4. 1 ワーク計測機能

UVM シリーズでは、機上でのワーク計測機能の充実が図られている。図4は選択可能な機上計測機能を示したもので、タッチプローブ式では、多様な形状に対応可能な自動計測機能を有し、 $\Phi 0.3\text{mm}$ の小径ボールスタイラスの使用を可能として、微細形状への対応可能範囲を拡大している³⁾。また、高精度な自由曲面形状を計測することが可能な倅い走査式の計測装置³⁾、加えて、より微細な形状に対する機上計測に対応すべく、撮像式の機上計測装置を新たに開発した。倍率の異なる2つの機上カメラを用い、タッチプローブでは計測できない微細な形状や、プローブ接触によるダメージを避けることが必要なワークの寸法計測を可能としている。

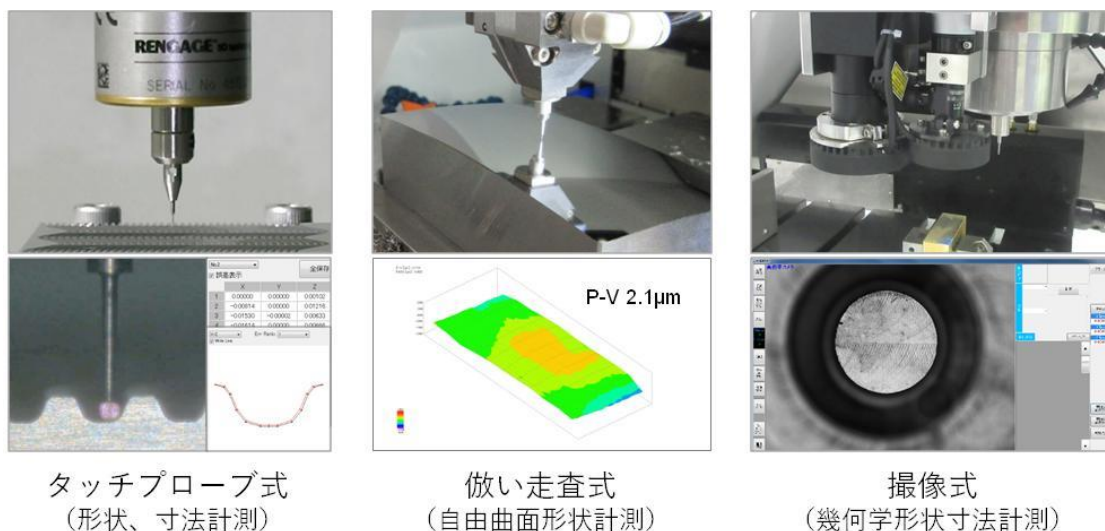
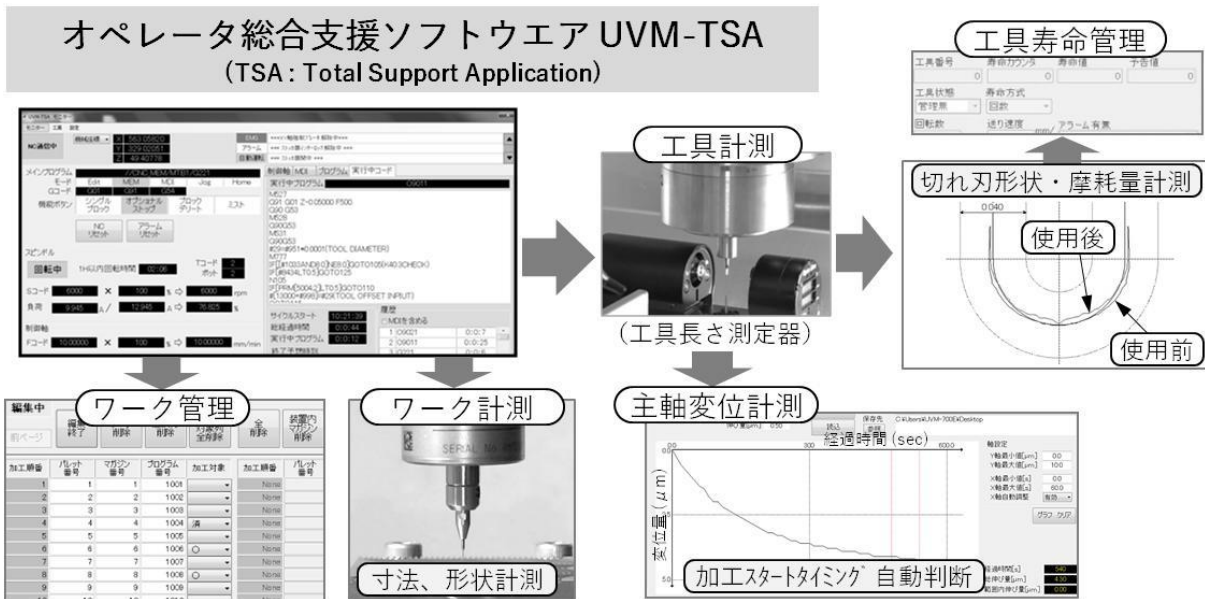


図4 多様な機上計測機能

4. 2 オペレータ総合支援ソフトウェア

昨今では、時代の流れに応じ、従来、人の手や経験に頼っている金型製作の精度管理においても、自動化の要求が大きくなってきている。特に微細加工の領域では、より高いレベルでの加工精度再現性の確保が必要とされる。本要求に応えるためには、加工機本体が高精度かつ恒精度であることに加えて、ワークの取り付け誤差や工具に起因する加工誤差の補償技術なども自動化を実現する必要がある。当社では、これらの課題に対し、自動化と高精度化の双方を志向したオペレータ支援機能として、オペレータ総合支援ソフトウェア「UVM-TSA」(TSA: Total Support Application)を開発している。本ソフトウェアの概略を図5に示す。4.1項で紹介した機上ワーク計測装置の操作や、光学ラインセンサ方式の工具長さ測定器によって取得される情報の解析など、様々な機能を実現している。工具管理においては、回転する切れ刃の輪郭情報を連続的に取得することにより、工具直径寸法だけでなく、工具切れ刃輪郭の詳細な形状誤差やボールエンドミルの円弧切れ刃の近似半径値の算出も可能としている。これらの情報を基に、三次元形状加工の寸法や輪郭加工の高精度化を図ることができる。さらに、加工時間や切削距離だけでなく、加工前後の工具切れ刃輪郭形状計測結果に基づいて算出される摩耗量の累積値を閾値としての工具寿命管理も可能としている。加えて、工具長さ計測の主軸変位の継時的な計測結果に基づいての加工スタートタイミングの自動判断も可能である。変位量が設定時間で閾値内に飽和したと判断されたタイミングで加工を開始するシーケンスを設定することで、最短の暖機運転時間で加工を開始できる。一方、本ソフトウェアでは、ワークパレット情報管理機能も統合している。ワークパレット情報とNCデータを合わせて管理することにより、より高度な自動化システムの構築が可能である。



4.3 工具形状誤差補正機能

小径エンドミルの切れ刃輪郭形状は、工具メーカ各社の不断の開発により、ミクロンオーダーに精度管理されるようになった。しかし、工具は、実際の加工フィールドにおいては、加工機主軸に装着されて高速回転した状況であるため、同一型式の工具であっても、主軸の回転精度特性や工具ホルダの個体差によって、工具直径値や切れ刃の輪郭形状には数ミクロンのばらつきが発生する場合があります。特に、微細形状加工では、出来栄の再現性を損なう最大要因といえる。そのため、より高精度な仕上げ加工を行おうとすれば、使用する工具の動的状況での切れ刃輪郭を計測し、その結果に基づいてNCデータを作成して用いる必要がある。また、加工の進捗上、切れ刃の初期摩耗によって切れ刃の輪郭形状も変化するため、切れ刃の摩耗状況を中間計測し、計測結果に基づいてNCデータを再作成して以後の加工を継続するケースもある。また、加工後に機上で寸法計測を行い、その結果を基に工具直径値を変更したNCデータを作成して追い込み加工が行われる場合も多い。いずれの場合も、CAMソフトによるNCデータ作成作業に戻る必要がある。作業者にとっては製作時間のロスとなる。特に三次元形状の加工の場合には、切れ刃の理論形状からの輪郭誤差分を補正することも必要とされるが、CAMソフト側でNCデータに反映が可能な工具輪郭形状の情報は、直径値などの単一な値に限定されるため、対応は困難である。そのため、製作工程の原点に戻って3Dモデルを修正することが必要とされるが、モデル設計への後戻り作業であり、迅速な対応は事実上困難である。

このような技術課題を解決する手段の1つとして、切れ刃の輪郭形状を高精度に計測し、得られた計測データを基にNCデータの座標数値を自動補正する「工具切れ刃輪郭形状誤差補正システム」を開発している。図6に、本システムの概略を示す。機上での動的な工具形状計測結果から加工面の角度に応じた補正値を算出し、加工機コントローラ側においてNCデータ上の座標数値を補正して加工に反映させる手法である。機上での工具形状計測結果に基づいて都度、機械側で座標数値の補正を行うため、加工誤差補正のための3Dモデルの修正や、CAMソフトによるNCデータの再作成を不要とすることができる。すなわち、「CAMに戻らない誤差補正手法」であって、オペレータの作業負担を排除するとともに、補正作業による製作時間ロスの大幅低減も可能にするシステムである。

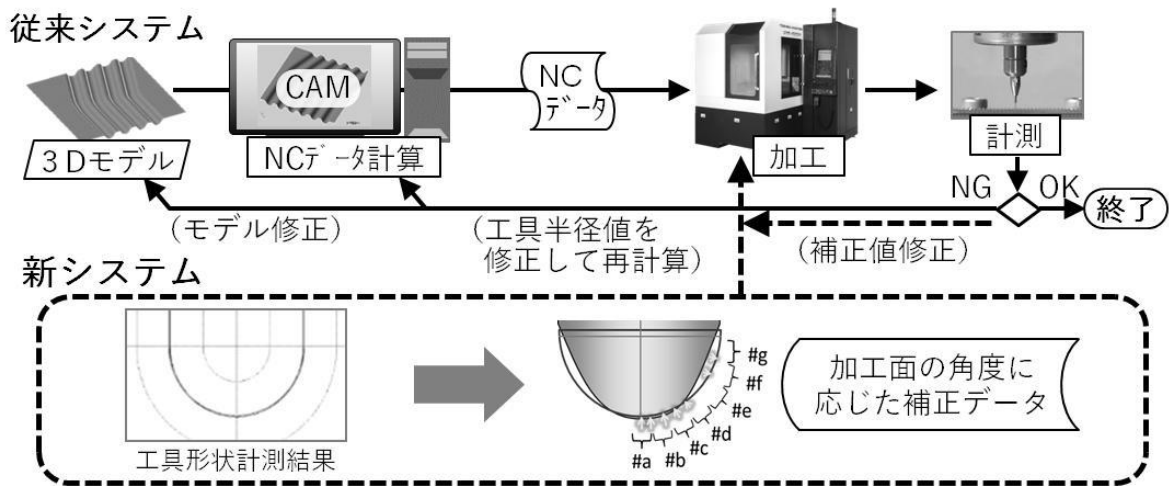


図6 工具切れ刃輪郭形状誤差補正システムの概略

5. おわりに

超精密マシニングセンタUVMシリーズの概要とオペレータを支援する付帯機能について簡単に紹介した。加工機の基本性能向上は言うまでもなく、特にミーリングによる微細加工では、工程中の各種の机上計測機能やデータ収集機能の充実が、高いレベルでの加工精度再現性の確保と自動化の両立実現に向けた第一歩と考える。引き続き、生産性向上、自動化、知能化など、未来への道を切り開く加工システムの開発に挑んでいく所存である。

参考文献

- 1) 東芝機械(株), ULC/ULG シリーズ:
http://www.toshiba-machine.co.jp/jp/product/nano/lineup/ulg_lg/index.html
- 2) 天野啓: 5軸仕様の超精密立形加工機による精密加工技術, 機械と工具, (10) 72 (2016)
- 3) 天野啓: 超精密加工における高効率化・自動化技術, 機械と工具, (11) 15 (2017)