

マイクロ複雑形状の機上計測支援システムの開発

東京農工大学 ○田村 拓哉, 東京農工大学大学院 ◎中本 圭一

要 旨

超精密切削加工において、加工後のワークを加工機から取外すことなく機上で計測する技術が開発され、一部では実用化されている。しかし、加工される形状は非軸対称形状など複雑な自由曲面に移り変わっており、従来より高度な機上計測技術が求められている。そこで、本研究では測定プローブの姿勢が計測結果に与える影響を調査するとともに、同時多軸制御による機上計測を行ってその有用性を確認した。

1. 緒 論

近年、非球面レンズに代表される光学素子の金型などでは、ナノメートル単位の形状精度が要求されている。一方、加工精度は加工機の運動精度と、それ以外の工具の寸法精度やセッティング、加工条件などからも影響を受ける。そこで、計測結果を基に補正加工を行うため、加工後のワークを加工機から取外すことなく加工機上で計測する技術が開発され、一部では実用化されている。しかし、要求される加工形状は非球面や非軸対称といった複雑な自由曲面へと移りかわっており、より高度な機上計測技術が要求されている¹⁾。

複雑な自由曲面を高精度に計測するためには、従来の非球面レンズ金型のようにワークの頂点を中心とする直交2断面計測では不可能である。このため、図1に示すようにワーク全面を3次元走査する必要から計測時間が長くなる。また、傾斜の大きい形状を高精度に計測する必要もある。そこで本研究では、高精度かつ効率よく計測するために機上計測器の特性を考慮した、計測経路および重点的な計測領域の決定を目的とする。

2. プローブの姿勢が計測結果に及ぼす影響

本研究では、図2に示す超精密多軸加工機 FANUC ROBOnano-Ui および、接触式機上計測器 FANUC NANOCHECKER を用いる。加工機の各軸の最小分解能は直進 X, Y, Z 軸が 1 nm, 回転 B, C 軸が 0.00001° である。また計測器の最小分解能は 1 nm であり、図2に示すように加工機の B 軸テーブルに設置することにより NC 装置で制御することができる。接触式の機上計測器の計測結果は、プローブの接触角度の影響を受けることが予想されるため、計測時のプローブ接触角度を変化させることで、計測に及ぼす影響を検証した。

以下に実験の手順を示す。まず、図3に示すように、プローブの姿勢を測定面の法線ベクトル N に対するプローブ軸ベクトル T の傾斜角度 θ と、走査方向ベクトル F からの法線周りの回転 ϕ によって定義する。次に、鏡面加工を施した Al 平面をワークとしてプローブを接触させ、10 mm 走査することでプローブの変位を計測する。このとき、 ϕ は 0° から 180° まで 30° ずつ、 θ は 0° から 30° まで 10° ずつ変化させた。 θ は B 軸テーブルを

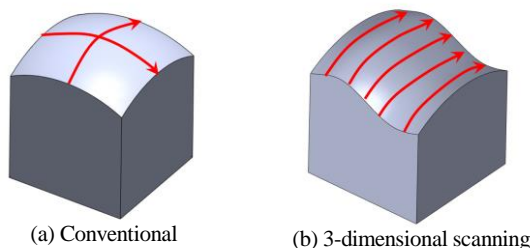


Fig.1 Measurement path

回転させることで変化させるが、本研究で使用する計測器は X 軸周り回転の自由度を持たないので、走査方向を変化させることで ϕ の値を変化させた。

まず $\phi = 0^\circ$ の場合の結果を図4に、 $\phi = 180^\circ$ の場合の結果を図5に示す。プローブの姿勢が計測結果に影響を与えないのであれば、 θ の値によらずプローブ軸が測定面の法線方向と一致する $\theta = 0^\circ$ の結果と同じになるはずである。しかし、図3、図4では θ の値が大きくなるほど $\theta = 0^\circ$ の結果と大きく異なっている。なかでも計測開始地点付近で大きく値が変動しているのが分かる。これは、測定面間との摩擦力が計測時のプローブ走査方向と逆方向に働き、これが $\phi = 0^\circ$ の場合にはプローブを引っ張る方向に、 $\phi = 180^\circ$ の場合はプローブを押し込む方向に加わるためと考えられる。さらに、 θ の値が大きくなるほど計測結

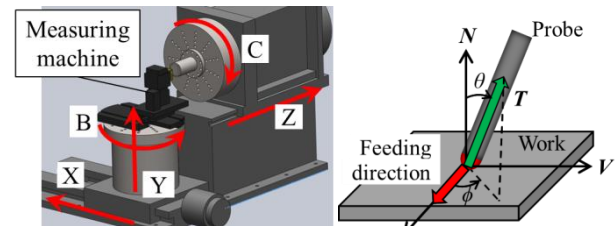


Fig. 2 Machine structure

Fig. 3 Probe attitude

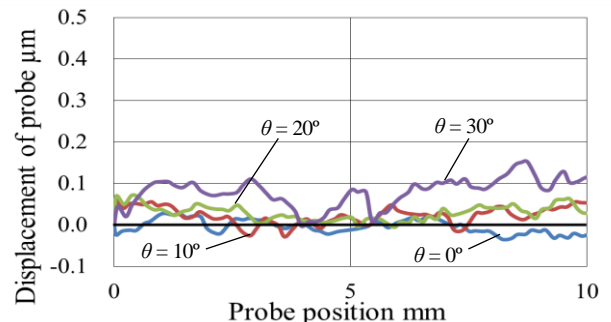


Fig. 4 Measurement result ($\phi = 0^\circ$)

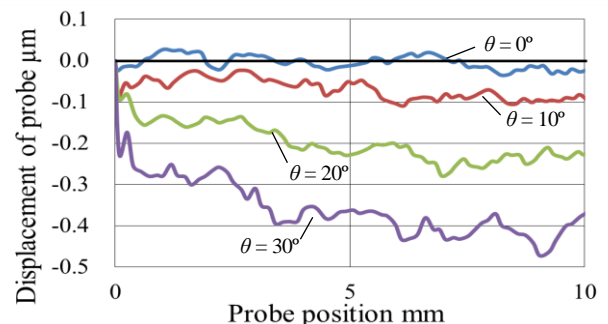


Fig. 5 Measurement result ($\phi = 180^\circ$)

果が不安定になっていることも分かる。これは、プローブの傾きが大きくなることによって測定面に対する接触力の垂直分力、つまりプローブを面に押し付ける力が小さくなり、プローブが振動しやすくなるためと考えられる。

続いて、 ϕ が 0° から 180° 間のプローブの姿勢の影響について述べる。ここで、ワークを鏡面加工する際は X 軸単純送り加工するが、 ϕ が 0° から 180° 間の計測において X、Y 軸の同時 2 軸制御または、X、Y 軸の単純送りを用いる。X 軸の単純送りを用いて加工された面には X 軸の運動誤差の影響が含まれており、X 軸制御のみの計測では問題はないが、Y 軸を用いて計測するとその影響を受け計測結果にうねりが生じてしまう。そのため、 ϕ が 0° から 180° 間のそれぞれの場合について、 $\theta = 0^\circ$ の場合におけるプローブの変位をオフセット処理することを考えた。しかし、X 軸の運動誤差の影響は大きく、完全にキャンセルできないため、運動誤差の影響を受けにくいと考えられる計測開始地点付近について注目した。

図 6 に計測開始から得られた 10 点のプローブの変位の平均を示す。 θ の値が大きくなるほど $\theta = 0^\circ$ の結果と大きく異なっており、これは前述と同様に θ の値が大きくなるほど摩擦の影響が大きくなるためと考えられる。また、 ϕ の値が 90° に近づくほどプローブの変位が小さくなっているのが分かる。これは、 ϕ の値が 90° に近づくほど摩擦によるプローブの押し込み方向、または引っ張り方向の力が小さくなるためだと考えられる。さらに、 ϕ が 0° 方向と 180° 方向では、後者の方が摩擦が計測結果に及ぼす影響が大きく、この計測器はプローブを押し込む方向の力により大きな影響を受けると考えられる。

以上のことと保証されている計測器の測定精度が 40 nm であることを踏まえて、この計測器を用いて机上計測を行う場合の計測器の許容されるプローブの姿勢は、 θ が 10° 以下、 ϕ が 30° - 150° の範囲と推測される。

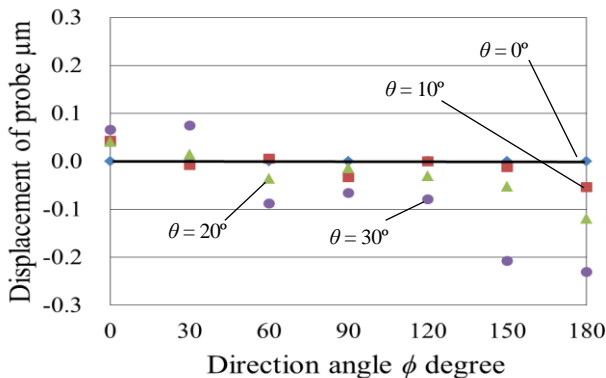


Fig. 6 Measurement result ($\phi = 0^\circ$ - 180°)

3. 同時多軸制御による机上計測

従来の同時 2 軸制御による形状測定では、傾斜角の大きい形状を計測する場合に、プローブが測定面に対し大きく傾いて接触してしまうため、前述のように計測結果に悪影響を及ぼしてしまう。また、プローブが傾いた姿勢で測定面に接触すると接触力により、プローブ自身に変形してしまい、想定した位置を計測することもできない²⁾。そこで本研究では、常に測定面の法線ベクトルとプローブ軸が一致するように直進 X、Z 軸および回転 B 軸を用いた同時多軸制御による回転軸を用いた計測を行い、その有用性を示す。図 7 に R5.55730 mm、真球度 $0.1 \text{ }\mu\text{m}$ 以下の校正用基準球を直進軸計測および回転軸計測で計測した

様子を示す。また図 8 にその結果を示す。但し、計測経路は基準球をプローブ先端球の半径分オフセットした面をプローブの中心が通過するように生成した。

図 8 から分かるように、直進軸のみの計測では計測開始付近および計測終了付近で大きく値が変動しているのに対して、回転軸を用いた計測では変動が見られない。これは、計測開始、終了地点付近において測定面に対しプローブが大きく傾いた姿勢で接触し、摩擦の影響が大きくなるためと考えられる。また中央付近の計測結果から分かるように、直進軸のみの計測に比べ回転軸を用いた計測の方がプローブの変位が小さい。計測中は測定面の法線方向は刻々と変化し、直線軸のみの計測では接触力の垂直分力、つまりプローブを押し付ける力も変化してしまう。一方、回転計測ではプローブ軸と測定面の法線方向が常に一致するように制御するため、プローブを押し付ける力は理論上一定に保たれる。そのため、回転計測の方が高精度に計測することができると思われる。

4. 結 論

接触式机上計測器のプローブの姿勢が、マイクロ複雑形状の計測結果に及ぼす影響を示すことができた。これにより、高精度に計測するためには測定面に対し、プローブを法線方向に近い姿勢で接触させる必要があり、その目安は θ が 10° 以下、 ϕ が 30° - 150° の範囲であることが明らかになった。また、校正用基準球に対し同時多軸制御による机上計測を行い、その有用性を確認した。

参考文献

- 1) 洪 榮杓ら:超精密加工機における机上計測器能, 2008 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 1095-1096, (2008)
- 2) 根岸真人: 接触式形状測定の実業における技術開発の動向, 精密工学会誌, 80 巻, 6 号, pp. 506-509, (2014)

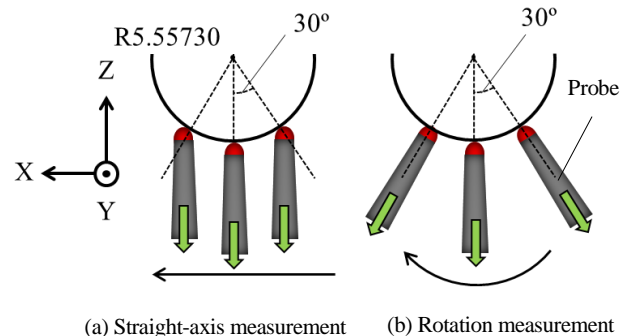


Fig.7 Measurement of reference sphere

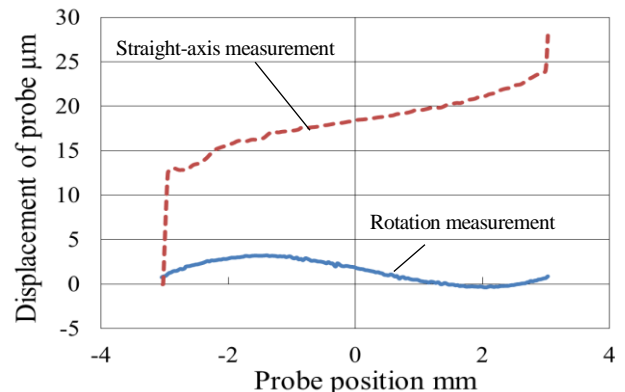


Fig.8 Measurement result of reference sphere