

# 三角測量式変位計による三次元機上計測に関する研究

長崎大学大学院工学研究科  
大坪 樹

一般治具・金型などの精密加工分野において、加工の高精度化、高能率化を実現する手段として機上計測・修正加工が知られているものの、その使い勝手と信頼性が不十分である。そこで本研究では、使い勝手・信頼性を有する機上計測システムの構築を目的とする。本研究では、光プローブ変位計に光スキッド機能を付与し、**(a)工作機械固有の問題**、**(b)工作物に起因する問題**、**(c)外乱による問題**を低減できることを個別に検証するとともに、最適な機上計測用光スキッドセンサを設計し、その有効性について検証した。

## 三角測量式光スキッドセンサの設計・製作

機上計測で評価する仕上げ面パラメータは、表面粗さ、表面うねり、表面形状、輪郭（外観）に大別できる。このうち表面粗さは、工作機械の性能よりも加工現象に依存する割合が強く、加工条件により高精度を得ることが多い。したがって、本研究の対象から除外する。その場合の問題は、**(1)測定時間と分解能**、**(2)現場の使い勝手**、**(3)信頼性**の3つに大別できると考える。本研究では、(1)を満たすために非接触・高速走査とし、(2)使い方が簡単で対象範囲が広い三角測量式光プローブを採用して、(3)の信頼性向上について、照射光学系を同軸とする光スキッド法の導入による解決を提案した。製作したセンサの照射レーザは、測定面において楕円形状をしており、そのままスキッドプローブとなっている。また、受光部に設置したスリッドでスポット中心成分のみを取り出し、これをスタイラスとしている。受光部は楕円レーザの短軸方向に、スキッドとスタイラスの光学系が光軸を挟んで対象に設置している。製作したセンサを用いて実験・検討した結果、センサの特性と被測定物形状が測定に及ぼす影響について以下のことが明らかになった。

## 光スキッドセンサの振動除去効果の評価

機上で測定する場合、環境振動、センサ走査時の運動誤差により、測定誤差が発生する。これらの影響の除去を目的とした光スキッドセンサを開発した。その振動除去特性について、評価実験を行い以下の結果を得た。

- 1) 静特性評価の結果、振動周波数による測定結果への影響は小さいこと
- 2) 動特性評価の結果、スタイラスとスキッドの受光量の違いにより、アンプの増幅率が異なるため、スタイラスとスキッドの時定数が異なり、光スキッド法による振動除去効果が小さくなること

## 測定原理の問題と解決方法

これまで三角測量式光プローブ変位計に光スキッド法を導入し、その有効性を確認してきている。しかしながら、センサがもつスキッドのプローブ径より、長い波長成分を含む形状を測定する場合、光スキッド法の原理上、測定で得られる形状の振幅は、被測定物の実形状の振幅と異なってしまう場合がある。そこで本研究では、光スキッドセンサにおいて被測定物形状の再生手法を提案し、実験およびシミュレーションし、以下の結果を得た。

- 3) 表面形状を正弦波の重ね合せと定義し、形状の波長を $\lambda$ として $\lambda = A \sin\{2\pi(x-x_0)/\lambda\}$ とおき、スキッド・スタイラスの平滑化効果をスポット径内の移動平均として演算した結果、その波長成分を抽出すれば、元の形状が再生できること

## 矩形段差形状の測定

レーザ変位計を用いて輪郭形状を測定する場合、エッジにおいて測定誤差が発生するが、それをソフトウェアで丸め込んでいるのが現状である。しかし、その丸み込みがエッジ検出においてどの程度の精度で有効であるか実験的に実証した例はなく、その検証が求められている。そこで本研究では、センサの信号とエッジ位置の関係を評価し以下の結果を得た。

- 4) 段差形状測定の場合、両受光部が段差形状と平行もしくは $\pm 5$ 度の範囲内になるようにする必要があること  
5) 三角測量式変位センサにより、エッジ位置を特定する場合、センサ進行方向に照射スポット半径分の誤差が生じること

## 曲面形状測定

センサの受光方向と測定面の傾斜は、測定モード変化を引き起こす。そこで、測定面傾斜が測定感度に与える影響について評価し、高精度形状計測方法を提案し、その有効性について以下の結果を得た。

- 6) 測定面の送り方向傾斜が感度に与える影響は小さいが、送りに垂直方向への傾斜は測定モード変化により大きな影響を与えること  
7) 高精度曲面形状計測方法としてセンサの投光軸を測定点の法線ベクトルと一致させ測定法線一致式測定方法を提案し、その有効性を実験的に確認した。

以上の結果から、三角測量式光プローブ変位計を用いて高精度に形状計測するには、①センサの2つの受光系の受光量を一致させること、②センサ光軸を工作物法線ベクトルと一致させること③エッジに対しスポット長軸を垂直にすること④測定結果に形状再生手法を適用すること、が必要になることを明らかにした。

# Measuring Three-Dimensional Shape Using a Laser Displacement Meter on the Machine Tool

Graduate School of Engineering, Nagasaki University  
Tatsuki Otsubo

In the field of precision machining, on-machine measurement is necessary to improve the accuracy and the efficiency of the machining. But it is seldom used in precision machining. When on-machine measurement is applied to the machining processing, there are necessary conditions that are measurement time, measurement resolution, ease of use of a system and a reliability of measurement. The authors proposed the triangulation method sensor with the optical skid to remove the vibration error and we have showed effectiveness of vibration rejection. In this study, we have carried out research in order to get the high measurement accuracy when we measure the three-dimensional shape by using the triangulation method sensor with optical skid.

## **Optical skid sensor**

Measurement objects are surface profile, waviness, and dimension. Surface roughness depends on the machine conditions than the performance of the machine tool. Surface roughness is not the measurement object. When on-machine measurement is applied to machining processing, necessary conditions are the measurement time, measurement resolution, ease of use of the system, and the reliability of measurements. The on-measurement sensor must be able to perform high-speed scanning in a non-contact mode. Therefore, we selected a laser displacement meter using the triangulation method, for which it is necessary to remove the influences of vibrations between a measurement surface and the displacement meter. The authors proposed a triangulation sensor method that uses an optical skid to remove the vibration error. A triangulation method sensor with the optical skid method made using a new design concept is proposed. The developed sensor comprises the irradiating optical system, and two optical receiving systems. In the irradiating optical system, the averaging effect of the optical skid depends on the spot size. Therefore, the ellipse beam laser was used to obtain a smoothing effect and a high horizontal resolution. Each optical receiving system has an imaging lens and a detector. Instead of two laser spots of different sizes, two detectors with different sizes of receiving area serve as the optical skid. We evaluated the characteristics of the developed sensor.

### **Characteristics of the skid sensor for removing vibration**

We evaluated the effectiveness of vibration removal of the sensor, experiments of vibration removal were carried out by a PZT actuator. We applied the frequency vibration and the transient vibration to the measurement object by a PZT actuator. The conclusions reached are as shown (1)-(2) below.

- (1) It is possible to remove the applied frequency vibration by the skid sensor.
- (2) As the results of evaluating the dynamic characteristics of the sensor, the receiving light amount is different from  $S_t$  and  $S_k$ . So, the time constant is different from  $S_t$  and  $S_k$ . Therefore, the effect of removing the transient vibration decreased.

### **Problem of optical skid method and reconstructing method**

In on-machine measurements, measurement of the surface profile with long wavelength is often necessary. If the spot diameter of the skid is not much larger than the surface profile wavelength, then the smoothing effect of the skid is reduced. Therefore, the amplitude of the measured profile by the skid sensor is smaller than actual amplitude of the workpiece. We proposed a method of reconstructing the surface profile from the measurement results and the obtained effects of the reconstruction method from simulations and experiments.

On-machine measurement is used to measure dimensions, shape profiles. When using the displacement sensor with triangulation method to measure the edges of the shape profile, the edge affects the measurement. Therefore, detecting the edge position correctly is difficult. However, no study has clarified the relation between the displacement sensor output and the exact edge position experimentally. Therefore, this study was conducted to determine the relation between the displacement sensor output and the exact edge position identified using the anti-pinhole method, which the authors proposed. The method uses a spatial frequency filter to detect the edge with greater than sub-micron precision. The following conclusions were obtained from this experiment.

1. The light receiving unit is needed to set with  $\pm 5\text{deg.}$  or parallel to the step-shape. In this case, the sensor feed direction is not important.
2. For detecting the edge position of the step from the sensor output, the detected edge position has error in the feed direction of the sensor from an exact edge position.

### **Influence of inclined surface on measurement sensitivity**

We have carried out research in order to get the high measurement accuracy when we measure the three-dimensional shape by using the triangulation method sensor with optical skid. The free-form surface has various shapes that are a curved surface. These shapes cause the measurement errors. The inclined shape of the measurement position changes the measurement mode. We evaluated the influence of the inclined shape on the measurement sensitivity. The following conclusions were obtained from this experiment.

- ① When the measurement surface inclined to the light receiving unit, it affected the measurement sensitivity. On the other hand, influence of the inclined surface of the vertical direction to the light receiving is small.
- ② When measuring the surface profile, it is necessary to match the optical axis of the sensor and the normal vector of measurement surface.

According to the results of these experiments, measuring the object shape with high accuracy by a laser displacement meter with optical skid method is needed as follows: I –IV

- I. To match the received light amount of  $S_t$  and  $S_k$
- II. To match the optical axis of the sensor and the normal vector of measurement surface
- III. To make the long axis of the ellipse spot vertical to the edge of measurement object
- IV. To use the reconstructing method