

正弦波振動干渉パターンを用いる金属円筒断面 形状計測に関する研究

李 金 環*

Study on measurement of sectional profiles of metal cylinders using a sinusoidally vibrating interference pattern

by Jinhuan LI

精密加工部品の平面形状については古くから多くのレーザ測定器があるが、金属円筒の直径や断面形状、ネジゲージのねじ山形状あるいは歯車の歯面形状などの断面形状測定などについては十分な研究開発が行われていない。これらの断面形状を高精度でかつ短時間で測定するレーザ測定器の研究開発を目的とする。形状測定には機械的な触針あるいは非接触型の光触針（光プローブ）が従来から広く用いられているが、1点ごとの測定となるため機械的な走査が必要となり、測定時間が長くなる欠点がある。また、ねじ山形状のような断面形状測定の場合は、斜面部分の形状が触針と大きな角度をなすために、測定が困難となる。一方、測定物体の断面形状に応じて、測定物体に照射した光が遮られることから、断面形状の頂点位置を測定する方法は以下の2つがある。(1)細いレーザ光を機械的に走査し、光が測定物体で遮断される位置を検出することから頂点位置を測定する。この場合は、機械的走査が伴うため、測定精度は低くなり、数 μm 程度となる。(2)測定物体に平行な光を照射し物体の影の像すなわち断面形状の拡大像を CCD カメラで検出し、各画素の光強度を正確に解析することから断面形状の頂点位置を測定する。この場合は、頂点座標は CCD カメラの画

素位置によって表現されるため、CCD カメラの画素サイズ、画素数が測定精度、測定範囲に大きな影響を及ぼし、1 μm 程度の測定精度なる。

そこで、本研究では、2次元平面に広がっている正弦波振動する干渉縞パターン (SVIP) レーザ光を用いる計測原理を活用する。この場合、SVIP 自体に位置座標を表現する目盛りが付けられているため、測定精度は SVIP の正弦波強度分布の周期 P だけで決まり、測定精度は P/200 程度となる。SVIP によって生じる干渉信号の検出は 2次元 CCD カメラで検出される。干渉信号の位相検出においては、CCD カメラの画素の一辺の大きさが P/8 位と大きな場合であっても、画素領域における位相の平均値が得られる。この特性によって、CCD カメラの画素サイズの大きさは物体面上において P/8 位にすることができ、数 cm 程度の大きさの測定領域となる。また、照射する SVIP 光自体に付けられている位置座標を使用するため、CCD カメラ画素配列位置を用いることによって生じる測定精度への影響はなくなる。

本論文は全 6 章で構成される。

第 1 章では、研究の背景、目的、および本論文の構成について述べる。

第 2 章では、本研究で用いる正弦波位相変調干渉

*新潟大学大学院自然科学研究科

現在 中国東北師範大学

〔新潟大学博士（工学）平成 18 年 3 月授与〕

法の原理について述べる。正弦波位相変調干渉法では、振動するミラーで容易に、正確に参照光に位相変調を与えることができる。また、検出された干渉信号の周波数解析を行い、位相変調周波数の基本周波数と高調波周波数の成分を用いて、必要とする干渉信号の振幅、位相を求めるため、雑音の影響を受けにくく、高精度で位相を測定することができる。CCDカメラを用いて時間的に変化する正弦波位相変調干渉信号を検出する方法は既に確立されている。また、機械的な振動による位相変動を取り除くために、フィードバック制御を用い参照光のミラーを変位させる。このためのフィードバック制御信号も容易に干渉信号から取り出すことができる。

第3章では、円周に沿ってV字型溝がある金属円筒を測定対象として、SVIPを用いた断面形状測定装置の構成と測定方法について詳しく説明する。半導体レーザーからの平行レーザー光をビームスプリッターで2つに分け、それぞれ2つのミラーで反射させた後、再びビームスプリッターで重ね合わせる。この2つの平行レーザー光をアフォーカル結像系に入力し、この結像系のスペクトル面上で2つ平行レーザー光だけを通過させる2つのピンホールを置き、正確に正弦波強度分布を有する周期Pの干渉縞パターンを測定物体上に作る。次に、1つのミラーを圧電素子PZTによって正弦波振動させることによって、干渉縞パターンをx軸方向に正弦波振動させる。このように正弦波振動する干渉縞パターン(SVIP)光が測定物体上に形成される。

測定物体の頂点位置の座標は、断面形状に応じてy軸方向に沿って変化している。断面形状の像をアフォーカル結像系で作成し、断面形状の頂点座標を測定することを考える。アフォーカル結像系のスペクトル面上で、頂点位置から来る光だけをスリットで選択的に通過させることによって、頂点位置の像すなわち測定物体の断面形状の像を得ることができる。測定物体に照射した干渉縞パターンが正弦波振動していることから、像面に生じる頂点位置の像の光強度分布は時間的に変化しており、CCDカメラによって検出される信号は正弦波位相変調信号と呼ばれる。この検出信号の振幅がx軸方向に沿って最大

となるCCDカメラの画素位置における、この信号の位相、すなわち干渉縞パターンの位相を求めれば、x軸方向に沿っての断面形状の頂点位置が得られる。このようにして得られる頂点位置をy軸方向に沿って連続化すれば、断面形状が求まる。金属円筒の円周上に作られた幅1mm、深さ1mmのV字型溝の断面形状を測定対象とし、本測定装置の基本特性を明らかにした。SVIPの周期 $P=100\mu\text{m}$ 、測定間隔 $9\mu\text{m}$ で測定を行った結果、測定誤差は溝幅で $0.5\mu\text{m}$ 以下、溝深さで $1\mu\text{m}$ 以下の測定誤差であった。その後、ねじゲージの片側の断面形状を同様な測定誤差で測定した。これらの測定では、測定範囲の大きさは数mm程度であり、SVIPによる目盛だけで断面形状の頂点位置を求めることができる。

第4章では、SVIPを用いて円筒の断面形状すなわち直径の測定を行う。この場合は、10mm程度離れた2つの断面形状の頂点位置を測定する必要があるため、SVIPによる目盛の他にCCDカメラの画素配列位置を用い、断面形状の頂点座標を求める。この場合には、アフォーカル結像系の像倍率の値が重要となるため、直径が既知の円筒を用い、像倍率の値を正確に求める必要がある。また、CCDカメラの画素上でのSVIP自体の位相分布が時間的に変化しないことが望ましいため、ある1点のSVIP自体の位相の値を常に一定値とするフィードバック制御系を付け加えた。直径8mmから9mmの円筒の直径をy軸方向に沿って10mmの範囲で測定した結果、直径の測定値はy軸に沿って $4\mu\text{m}$ 程度の幅で細かく変動していた。y軸に沿っての直径の平均値については、 $1\mu\text{m}$ 以下の繰り返し測定誤差となった。

第5章では、前章と同様な測定方法で、直径10mmのねじゲージの両側の断面形状を測定する。アフォーカル結像系のスペクトル面上に置くマスクについて、左右の両側のねじ山形状を測定するために最適なマスクを決定した。また、ねじ山が円周に沿って続く方向が、左右の断面形状で異なるため、ねじをアフォーカル結像系の光軸方向に傾ける必要がある。測定の結果、ねじ山の幅と深さなどの値は、 μm 以下の測定誤差で測定できた。

第6章では、本研究の成果をまとめている。