DOI:10.19652/j.cnki.femt.2204417

一种面结构光三维测量系统的不确定度分析评定

李　双　王中宇
(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 北京 100191)

摘　要:面结构光三维测量方法是一种典型的非接触式测量方法,在扫描测量领域具有广泛的应用,为了定量评估其测量结果的质量、可靠性,需要对不确定度进行评定。结合传统误差分析方法对面结构光测量系统的原理进行探究,采用基于测量系统分析(MSA)方法对不确定度来源进行分析并建立相应的分析模型;针对各不确定度分量设计对应的量化评定方案;分别使用测量不确定度表示指南(GUM)法与自适应蒙特卡洛方法(AMCM)对测量不确定度做出评定,并对评定结果进行分析比较。通过工件尺寸测量不确定度评定实例的结果表明,AMCM的评定结果较GUM法的结果更加可靠。同时,通过验证程序表明,对于本测量任务,在不确定度保留一位有效数字时,GUM法依然适用;但是在不确定度保留两位有效数字时,GUM法未通过验证,说明使用AMCM进行替代是有必要的。

关键词:面结构光测量系统;非接触式测量;不确定度评定;自适应蒙特卡洛方法
中图分类号: TB92　　**文献标识码**:A　　**国家标准学科分类代码**: 460.4030

Uncertainty analysis and evaluation of a surface structured light 3D measurement system

Li Shuang　Wang Zhongyu
(School of Instrument and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Surface structured light 3D measurement is a typical non-contact method, with a wide range of applications in scanning measurement field. In order to quantitatively evaluate the quality and reliability of the measurement results, it is necessary to evaluate the uncertainty. Combined with the traditional error analysis method, the principle of the measurement system is explored. The uncertainty sources are analyzed by using the MSA method and the corresponding model is established. The quantitative evaluation scheme is designed for each uncertainty component, and GUM and AMCM are respectively used to evaluate the measurement uncertainty, and the results are analyzed and compared. The experiment of dimension measurement shows that the AMCM is more reliable than the GUM method. At the same time, the verification procedure shows that GUM method is still applicable when the uncertainty retains only one significant digit. However, when the uncertainty retains two significant digits, GUM method fails to be verified, indicating that it is necessary to use AMCM instead.

Keywords: surface structured light measurement system; non-contact measurement; uncertainty evaluation; adaptive Monte Carlo method

0 引　言

随着精密仪器、精密加工制造等领域的发展,零部组件的结构趋于更加复杂,轮廓的表面形状也趋于不规则,这就对零件三维轮廓的测量提出了更高的要求[1]。目前,随着机器视觉、图像处理等技术的快速发展,基于光学的非接触式的测量方法有了很大的进展[2]。

面结构光三维测量是一种典型的光学测量技术,具有扫描速度快、精度高、操作简单和环境要求宽泛等优势[3]。但目前在使用商用面结构光三维扫描测量系统时,通常仅能给出被测量的估计值,而估计值的测量不确定度却很容易被忽视。这样的测量结果不仅是不完整和不可靠的,而且还大大地降低了面结构光测量系统的使用价值。因此对面结构光三维测量系统进行不确定度分析和评定,对于

收稿日期:2022-10-17

合理地给出被测对象的性能指标、扫描测量的质量和提高扫描测量的精度都起着至关重要的作用。

本文对影响面结构光三维测量系统精度的主要因素进行分析。首先基于传统误差理论和测量系统分析方法(measurement systems analysis,MSA)对可能的不确定度来源进行探究,建立不确定度分析的数学模型;针对模型中的不同分量提出了相应的量化评定方案;其次基于测量不确定度表示指南(guide to the expression of uncertainty in measurement, GUM)方法和自适应蒙特卡洛方法(adaptive Monte Carlo method,AMCM)分别建立不确定度评定模型,并且对测量不确定度进行评定;最后给出面结构光三维测量系统的不确定度评定结果。

1 测量原理及不确定度来源分析

1.1 面结构光测量系统的基本原理

面结构光测量系统主要分为图像采集系统与图像处理系统两大部分。其中图像采集系统通常由成一定角度放置的投影仪、一个或两个CCD相机构成;图像处理系统往往借助计算机完成。面结构光测量方法的基本原理是投影仪将某相位信息已知的条纹图案投射到被测物体的表面,因物体表面高度不同,条纹受到不同程度的调制并在物体表面形成调制图像[4],图像经表面漫反射后由相机获取,如图1所示。

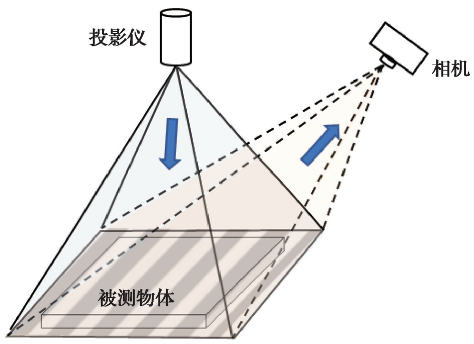


图1 面结构光测量原理

图像处理系统通过特定的解相、相位展开和系统标定技术提取到图像中每一点(m,n)对应的相位θ。根据图像中每一点(m,n)与物体空间坐标(X,Y)之间的映射关系,可建立相位θ与该点的物体空间位置(X,Y)之间的对应关系。通过测量系统的数学模型建立被测物体表面点的相位θ与高度信息Z之间的映射关系。进而通过被测物体表面点的相位θ求解出各点的空间位置坐标(X,Y,Z)。

综合以上步骤,可以将面结构光测量原理简化为:

$$\begin{cases}\theta = f(Z) \\ \theta = f(m,n) \\ (X,Y) = f(m,n)\end{cases} \rightarrow \theta = f(X,Y,Z) \tag{1}$$

1.2 基于MSA的测量不确定度来源分析

基于面结构光测量系统的原理,结合经典误差理论与不确定度理论,可以从测量装置、测量方法及原理、测量环境、测量人员及被测量对象等方面来分析影响测量结果的因素。

1)测量装置

投影仪引入伽马值导致的非线性响应[5]、投影光栅图像的质量和光栅条纹的周期数[6]选择会对测量结果产生影响。

相机的非线性响应、高斯噪声[7]、量化误差、边缘成像质量[8]、相机参数设置(如灰度参数、曝光时间等)也会对测量结果产生影响。

2)测量方法

(1)系统测量模型误差

由于分析模型的近似性和局限性、测量过程存在复杂的非线性关系等,建立的系统测量模型与实际测量过程不可避免地存在着一定程度的差异,从而导致三维重建数据的误差。

(2)测量系统标定误差

测量系统几何模型中的未知参数是通过标定来求解出来的,系统标定方法的准确性以及算法的精度都会对标定精度产生影响,进而影响测量系统的精度。

(3)软件算法误差

测量系统借助软件根据不同图像中的同一特征点进行拼接,图像之间的匹配精度会对最后的测量结果产生影响。同时,软件在处理测量得到点云数据的过程(平滑、优化、补齐、过滤、对齐等)中也可能引入误差[9-10]。

3)环境因素

环境因素包括温度[11]、电源的变化、振动、光的变化及均匀性[12]等。

4)被测对象

被测对象中最主要的因素是被测表面的光学特性。若被测表面过于光亮而发生镜面反射,就会导致相机接收不到部分反射光线;即使接收到反射光线,镜面反射也会使相机饱和从而表现为曝光过度,造成解相误差。必要时需要喷涂显像剂进行辅助测量;但是由于显像剂进行本身颗粒的大小且喷涂的不均匀,也会对被测表面轮廓产生干扰[13]。

5)测量人员及测量策略

(1)参考点粘贴

有些面结构光系统在测量时会通过参考点对多次、多方位拍摄的图像进行拼接来构建完整的三维形貌,参考点分布与个数设置的差异可能会对图像间的匹配精度产生影响[14]。

(2)测量距离及体积

为保证图像拍摄的质量,需要根据测量系统镜头的光圈、焦距等选择合理的测量距离,根据被测对象的尺寸选择合适的测量体积。

(3)点云处理策略

在使用点云软件处理测量数据的过程中,选取测量数据点、处理策略等的不同可能会对测量结果产生影响。

通过上述分析可以看到，影响测量系统精度的因素很多，这些因素与测量结果之间的传递关系很难确切掌握，并且即使掌握了但影响的程度却难以量化。因而传统的不确定度分析方法难以奏效。

基于测量系统分析的量值特性分析方法提供了新思路，并逐渐被应用于测量系统不确定度的分析与评定[15-16]。由于规避了对测量系统复杂模型的建立，忽略了复杂的测量过程与不确定度来源分析，因而大大地降低了面结构光系统测量结果不确定度评定的难度。

任何一个测量过程实质上都是一种量值传递的过程，该过程也伴随着误差的传递。误差对测量结果量值的影响就可以通过一系列量值的特征指标来表示，通过对测量结果的特性指标分析同样可以达到不确定度分析之目的，如图2所示。在QS9000配套手册《测量系统分析》中提出了评价测量系统的分析方法，给出了量值统计特性的6个指标，即偏移、线性、稳定性、分辨力、重复性和复现性。在对测量系统进行不确定度研究时，可以将6个精度指标转化为相应的不确定度分量。这些指标比较全面和充分地体现了各主要误差源对测量结果不确定度的影响程度。

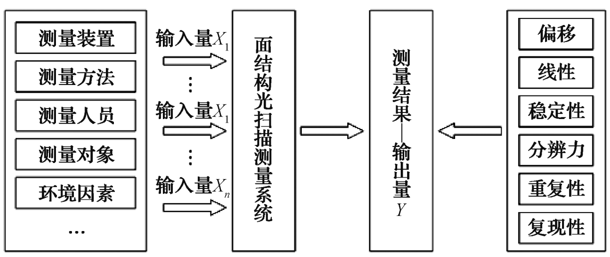


图2　测量系统不确定度来源分析流程

1)偏移、线性引入的不确定度

偏移反映了系统误差分量的综合影响。在设备测量范围内偏移的不同被称为线性。对于面结构光测量系统，主要关注某一具体测量体积内的测量能力，所以虽然偏移和线性是不同的精度指标，但是在面向具体的测量任务时，其对结果的影响可以一并考虑，因此，在进行测量不确定度评定时，这两个分量可以看为一个分量。

2)分辨力、重复性引入的不确定度

分辨力指测量系统识别并如实反映被测量微小变化的能力。重复性主要反映测量条件不变时随机误差对测量结果的影响(图3)。分辨力对测量结果的重复性测量有影响，在测量不确定度评定中可以只考虑其中较大项。

3)复现性、稳定性引入的不确定度

复现性主要反映了测量条件改变时的随机误差对测量结果的影响(图4)。稳定性反映测量系统保持其计量特性随时间恒定的能力。在复现性引入的不确定度评定中，改变的测量条件可以包括时间，即包括了稳定性引入的不确定度。因此，在进行面结构光系统测量不确定度评定时，可以只评定复现性引入的不确定度。

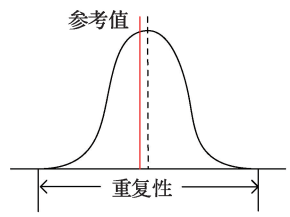


图3　重复性

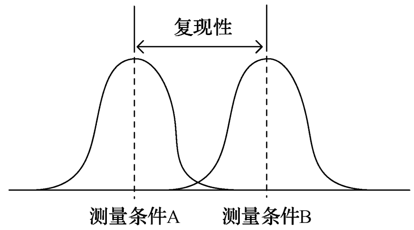


图4　复现性

综上，基于测量系统分析的量值特性方法，面结构光测量系统的不确定度来源主要考虑偏移、重复性、分辨力和复现性，同时可以建立测量系统面向测量任务的不确定度分析模型：

$$Y = y + \delta_B + \max(\delta_r, \delta_{RE}) + \delta_R \tag{2}$$

式中：Y表示被测量，如被测工件的半径、球径、平面度、轮廓度等；y表示被测量最佳估计值；δ_B表示偏移引入的不确定度；δ_r表示重复性引入的不确定度；δ_{RE}表示分辨力引入的不确定度；δ_R表示复现性引入的不确定度。

不确定度分析模型中的指标能够比较全面充分地体现各主要误差源对于面结构光测量系统不确定度的影响程度，如表1所示。

表1　面结构光测量系统的不确定度来源分析

不确定度来源	来源性质	特性指标	符号
投影仪非线性 相机非线性 量化误差 建模误差 软件算法误差 ⋮	测量系统本身的系统误差	偏移	δ_B
图像噪声 光照不均匀 被测物表面光学特性 ⋮	测量条件不变时的随机误差	重复性	δ_r
分辨力不足	分辨力不足导致的随机误差	分辨力	δ_{RE}
时间效应 测量人员 测量策略 环境 ⋮	短期时间效应导致的随机误差 测量条件变化时的随机误差	复现性	δ_R

2 测量不确定度评定

2.1 不确定度分量的量化评定方案

1)偏移引入的不确定度量化评定

偏移是测量平均值与参考标准值之差,它反映了测量系统自身的测量能力,而示值误差、探测误差等指标也同样反映系统的测量能力,因此可采用两种方案对偏移进行量化。

方法1,采用与被测物体相近的标准器进行示值误差的校准,以示值误差表征测量系统的偏移。例如测量对象是被测物体的长度,可以采用对相近尺寸的标准量块进行测量来标定示值误差…使用测量系统对标准器连续多次测量取平均值,示值误差计算如下式:

$$B_E = \bar{E} - E \tag{3}$$

式中:$\bar{E}$ 表示平均示值;E 表示标准器的标称值。

方法2,面结构光系统的尺寸测量能力可以由尺寸测量误差、球间距测量误差等来表示,而形状探测的能力则以探测误差来表征。所以可以参照国际视觉测量系统检测标准 VDI/VDE 2634-Part 3[17]来设计偏移的量化试验。

(1)基于球间距测量误差量化尺寸测量能力

采用球棒作为被测物体,计算测量得到的球间距与参考值之差称为球间距测量误差。标准器可选用陶瓷、钢的或者其他合适的材料,尺寸最好满足 $L_p \geqslant 0.3 \cdot L_0$($L_0$ 是测量体积的体对角线的长度)。球间距测量误差用于表征测量系统的长度测量能力,而且球间距测量误差是整个测量体积内的,所以应在多个位置被探究,球棒的位置如图5所示。

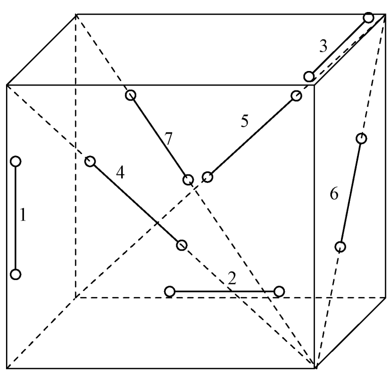


图5 测量空间内球棒的分布

对于所有测量位置,使用定半径拟合法拟合球棒两个球体的球心,并计算在该位置下的球间距。第 i 个位置的球间距测量误差 B_{Li},为两个球体中心之间距离的测量值与参考值之差:

$$B_{Li} = l_i - l_0 \tag{4}$$

式中:l_i 是第 i 个位置的球间距测量值;l_0 是球间距参考值。

取各位置得到的球间距测量误差绝对值最大值作为球间距测量误差:

$$B_L = \max(B_{Li}) \tag{5}$$

(2)基于球探测误差量化形状测量能力

采用标准球作为被测物体,各测量点与最小二乘拟合球球心之间径向距离的变化范围被称为形状探测误差。标准球可以选用陶瓷、钢的或者其他合适的材料,直径最好满足(0.02~0.2)·L_0。测量时,至少保证在3个不同的任意位置测量被测球体,且在整个测量范围内测量位置的分布尽可能均匀,标准球的位置如图6所示。

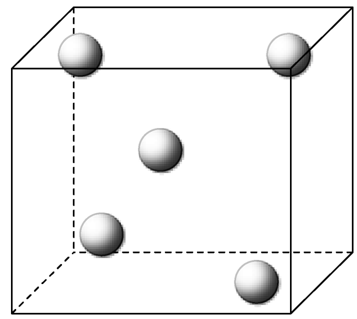


图6 测量空间内标准球的分布

用最小二乘法拟合标准球,所有点到拟合球心距离的最大值 $r_{\max_i}$ 与最小值 $r_{\min_i}$ 之差为该位置的形状探测误差:

$$B_{PFi} = r_{\max_i} - r_{\min_i} \tag{6}$$

取各位置得到的探测误差绝对值最大值作为形状探测误差:

$$B_{PF} = \max(B_{PFi}) \tag{7}$$

由于面结构光系统的可变动测量条件很多,所以在进行上述偏移的量化试验时,应对操作模式进行说明,包括选用的测量体积、测量设备型号、测量方式、数据的处理策略等。尽量保证偏移量化试验条件与工件测量条件的一致。

方法2涉及到整个测量体积内系统测量能力的探究,考虑到了测量系统边缘的情况,是对偏移的过量估计;方法1选用与测量任务相近的测量条件,所以得到的偏移量更为接近当下测量任务真实的偏移,但方法1对标准器尺寸形状等有要求,使用条件比方法2更有局限性。

确定测量系统的偏移后,采用B类评定,假设其服从均匀分布,则偏移引入的测量不确定度:

$$u_B = \frac{B_E}{\sqrt{3}} \tag{8}$$

式中:B_E 根据测量任务的不同也可替换为 B_L、B_{PF}。

2)分辨力引入的不确定度量化评定

测量系统的分辨力 R_E 一般可通过查询相应说明手册得到,对分辨力引入的不确定度采用B类评定,假设其服从均匀分布。扫描测量系统给出的分辨力通常是指形状分辨力,则对于面结构光测量系统形状测量由分辨力引入的不确定度分量:

$$u_{RE}=\frac{1}{\sqrt{3}}\cdot\frac{R_E}{2} \tag{9}$$

式中：R_E 表示测量系统的分辨力。

但是对于需要由形状拟合后间接得到的量，分辨力需要特别考虑。以长度测量为例，由于长度测量往往是通过对两个平面拟合后，求取两平面之间距离得到的，所以，系统对长度的分辨力其实是两个平面形状分辨力的综合，所以对于面结构光系统长度测量，分辨力引入的不确定度分量为：

$$u_{RE}'=\frac{1}{\sqrt{3}}\cdot\frac{\sqrt{2}\cdot R_E}{2}=\sqrt{2}u_{RE} \tag{10}$$

3)重复性引入的不确定度量化评定

对重复性引入的不确定度采用A类评定。在重复性实验要求下对被测工件进行重复性测量，一般重复测量数为10次左右，由贝塞尔公式计算单次测量的实验标准偏差：

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}{n-1}} \tag{11}$$

式中：y_i 表示每次测量的测得值；n 表示重复测量次数；$\bar{y}$ 表示重复测量的算数平均值。

若以单次测量结果作为测量最佳估计值，则测量重复性引入的不确定度分量 $u_r=S$；若以 N 次测量均值作为测量最佳估计值时，则测量重复性引入的不确定度分量：

$$u_r=\frac{S}{\sqrt{N}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}{N(n-1)}} \tag{12}$$

4)复现性引入的不确定度量化评定

对复现性引入的不确定度采用A类评定。通过不同操作人员在不同的测量条件下完成多组测量实验，测量策略尽量保持不同，可改变的测量策略可以包括转台转动的角度及次数、曝光时间、测量人员、测量时间等，测量策略的改变需在保证测量精度的范围内进行。操作人员都是具备专业测量知识与操作水平的，各自独立进行多组重复测量实验。

复现性引入的不确定度可用贝塞尔公式计算得到的实验标准差来表示：

$$u_R=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m}(\bar{y}_j-\bar{\bar{y}})^2}{m-1}} \tag{13}$$

式中：m 为进行独立重复测量组数；$\bar{y}_j$ 为第 j 组重复测量列的均值；$\bar{\bar{y}}$ 为 m 组均值 $\bar{y}_j$ 的均值。

2.2 不确定度评定模型

1)基于GUM方法的测量不确定度评定模型

根据《JJF 1059.1－2012 测量不确定度评定与表示》[18]，各不确定度分量相互独立，可以建立面结构光测量系统的不确定度评定模型：

$$u_c=\sqrt{u_B^2+\max(u_{RE}^2,u_r^2)+u_R^2} \tag{14}$$

式中：u_B 表示偏移引入误差的标准不确定度；u_{RE} 表示分辨力引入误差的标准不确定度；u_r 表示重复性引入误差的标准不确定度；u_R 表示复现性引入误差的标准不确定度。

扩展不确定度是被测量可能值包含区间的半宽度，由合成标准不确定度 u_c 与包含因子 k 得到，计算公式如下：

$$U=k\cdot u_c \tag{15}$$

被测量的值落在包含区间内的包含概率取决于所取得包含因子 k 的值，如果没有特殊要求，在通常的测量中，一般取 $k=2$。

以上是通过传统的GUM不确定度框架来评定测量不确定度。GUM法是评定测量不确定度最基础和根本的方法，但在使用上也存在一定的局限性。

(1)GUM法具有一定的前提条件，即输入量的概率分布为对称分布、输出量的概率分布近似为正态分布，且测量模型为线性模型或近似线性模型等。

(2)GUM法在评定扩展不确定度时，通常会默认被测量的概率分布近似为正态分布或 t 分布，但输出量的概率分布实际情况并非一贯如此，这种情况下通过GUM法给出的扩展不确定度可能偏离实际。

因此，虽然GUM法在大多数情况下被认为是适用的，但其实并不容易确定其适用条件是否得到了满足。而蒙特卡洛方法可以在一定程度上弥补GUM的使用缺陷，对在GUM中未明确涉及的不确定度评定的方面进行了补充。

2)基于AMCM的测量不确定度评定模型

蒙特卡洛方法是一种适用于计算机执行的评定测量不确定度的通用数值方法，该方法与GUM广义原则上是一致的。其基本思路是通过对不同分布的随机抽样来模拟对测量产生影响的随机误差源，代入测量作用原理方程，经过计算机进行大量的反复计算，可以得到一定数目的输出量 $y_i(i=1,2,\cdots,M)$，对其进行统计分析，进而可获得被测值的均值、标准差等信息。MCM的测量不确定度评定模型为：

$$u_c(y)=\sqrt{\frac{1}{M-1}\sum_{r=1}^{M}\left(y_r-\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}y_i\right)^2} \tag{16}$$

对于仿真试验次数 M 的选择，可以预先设定一个值，但是这可能过量也可能不能保证满足精度要求，而AMCM可以找到使所需要的各种结果达到统计意义上稳定的最小试验次数，可以经济高效的获得满足数值容差要求的输出量的估计值及标准不确定度、给定包含概率下的包含区间的上下界值。按照AMCM的评定流程[19]，借助MATLAB编写程序进行实现，程序流程如图7所示。

图7中，J 为最小整数，$\geqslant 100/(1-p)$，p 为置信概率；s_y 为 $y^{(1)},\cdots,y^{(h)}$ 的平均值相关联的标准偏差。

$$s_y^2=\frac{1}{h(h-1)}\sum_{r=1}^{h}(y^{(r)}-y)^2$$

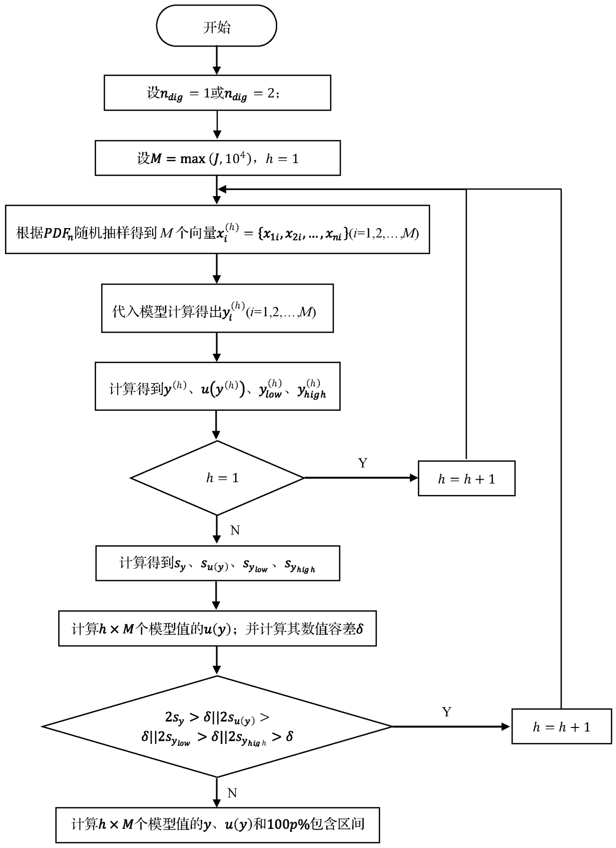


图 7　AMCM 程序流程

式中：$y=\dfrac{1}{h}\sum\limits_{r=1}^{h}y^{(r)}$。

$s_{u(y)}$、$s_{y_{low}}$、$s_{y_{high}}$ 分别为 $u(y)$、y_{low}、y_{high} 所对应的统计量：

$$s_{u(y)}^2=\frac{1}{h(h-1)}\sum_{r=1}^{h}(u(y^{(r)})-u(y))^2$$

$$u(y)=\frac{1}{h}\sum_{r=1}^{h}u(y^{(r)})$$

$$s_{y_{low}}^2=\frac{1}{h(h-1)}\sum_{r=1}^{h}(y_{low}^{(r)}-y_{low})^2$$

$$y_{low}=\frac{1}{h}\sum_{r=1}^{h}y_{low}^{(r)}$$

$$s_{y_{high}}^2=\frac{1}{h(h-1)}\sum_{r=1}^{h}(y_{high}^{(r)}-y_{high})^2$$

$$y_{high}=\frac{1}{h}\sum_{r=1}^{h}y_{high}^{(r)}$$

2.3　AMCM 验证 GUM 方法适用性

是否满足 GUM 方法的适用条件难以判断，根据《测量不确定度评定和表示 补充文件 1：基于蒙特卡洛方法的分布传播》，可用 AMCM 来验证 GUM 方法，具体步骤如下。

1）应用 GUM 法得到输出量的 $100p\%$ 包含区间 $y\pm U_p$。

2）确定不确定度 $u(y)$ 的数值容差 δ。

（1）令 n_{dig} 表示 $u(y)$ 有效数字的位数，把 $u(y)$ 表示为 $c\times10^l$ 的形式，同时，c 为 n_{dig} 位的整数，l 为整数。

（2）数值容差取：

$$\delta=\frac{1}{2}10^l \tag{17}$$

3）利用 AMCM 程序获得输出量标准不确定度 $u(y)$ 和给定包含概率为 $100p\%$ 条件下的包含区间的端点 y_{low} 和 y_{high}。

4）对 GUM 法和 AMCM 得到的包含区间进行比较，即计算两个包含区间各自端点的绝对差值：

$$d_{low}=|y-U_p-y_{low}| \tag{18}$$

$$d_{high}=|y+U_p-y_{high}| \tag{19}$$

如果 d_{low} 和 d_{high} 均不大于 δ，说明比较结果是合理的，GUM 方法可通过验证。

3　不确定度评定实例

3.1　实验设备

实验采用的设备是 Zeiss 公司的 COMET 6 16 M，其主要构成是光栅投影设备及一个 CCD 相机（图 8），测量基于条纹投影技术与蓝光技术。根据被测对象尺寸，各测量实验（图 9、10）均选择代号为 250 的测量体积（274 mm×193 mm×160 mm）。

图 8　Zeiss COMET 6 16 M

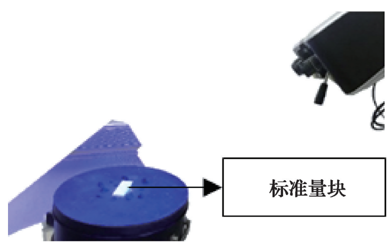


图 9　标准量块测量

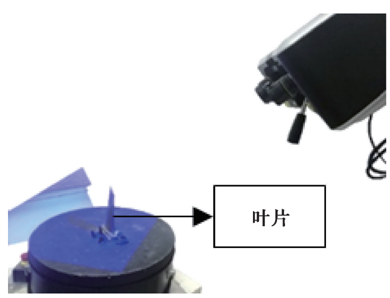


图 10　叶片测量

3.2 尺寸测量任务的不确定度分量量化实验

1)偏移引入的不确定度分量

通过对标准器的示值误差标定来量化偏移引入的不确定度分量，选用的标准器是标称值为 100.000 mm 的陶瓷材质的标准量块(图 11)。在温度为 20 ℃±5 ℃、相对湿度小于 65%RH、无光线干扰、无明显振动的环境中进行量化实验。

图 11　标准陶瓷量块

使用测量设备对标准量块的尺寸进行测量(图 12)，连续多次测量取平均值，作为尺寸测量的结果，测量结果如表 2 所示。

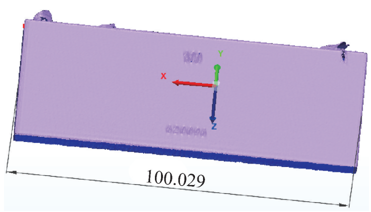


图 12　PolyWorks 计算量块尺寸

表 2　量块的尺寸测量结果

测量组数	测量结果/mm	测量组数	测量结果/mm
1	100.029	6	100.022
2	100.031	7	100.024
3	100.032	8	100.026
4	100.044	9	100.029
5	100.024	10	100.040
平均值/mm	100.030 1		

示值误差 B_E 按下式计算：

$$B_E=\bar{E}-E=100.030\ 1-100.000\ 0=0.030\ 1\ \text{mm}$$

式中：$\bar{E}$ 表示仪器平均示值；E 表示标准量块的标称值。

根据式(8)可计算偏移引入的不确定度分量为：

$$u_B=\frac{B_E}{\sqrt{3}}=\frac{0.030\ 1}{\sqrt{3}}=0.017\ 4\ \text{mm}$$

2)分辨力引入的不确定度分量

查阅 COMET 6 16 M 的手册得到，最大分辨力为 0.016 mm，则由式(10)计算尺寸测量中由分辨力引入的不确定度为：

$$u_{RE}=\frac{1}{\sqrt{3}}\cdot\frac{\sqrt{2}\cdot R_E}{2}=0.006\ 53\ \text{mm}$$

3)重复性引入的不确定度分量

叶片尺寸测量如图 13 所示。

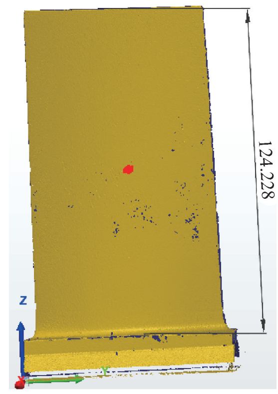


图 13　叶片尺寸测量

短时间内对被测工件尺寸进行 10 次连续快速测量，测量结果如表 3 所示。

表 3　尺寸的重复性测量结果

测量组数	测量结果/mm	测量组数	测量结果/mm
1	124.232	6	124.227
2	124.226	7	124.225
3	124.228	8	124.228
4	124.231	9	124.229
5	124.227	10	124.228

由式(11)计算重复性实验的标准差：

$$S_r=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(l_i-\bar{l})^2}{(n-1)}}=0.002\ 13\ \text{mm}$$

以 10 次测量结果的平均值作为尺寸测量的最佳估计值，可由式(12)计算测量重复性引入的不确定度分量为：

$$u_r=\frac{S_r}{\sqrt{10}}=0.000\ 674\ \text{mm}$$

4)复现性引入的不确定度分量

由代号为 A、B、C 的 3 名测量人员尽可能保持采样策略等因素差异性的条件下各自独立进行多组重复测量实验，测量结果数据如表 4 所示。

表 4　尺寸的复现性测量结果　(mm)

测量人员代号	重复测量平均值
A	124.229
A	124.227
A	124.256
A	124.228
B	124.230
B	124.246
B	124.217
C	124.227
C	124.231
C	124.216

根据式(13)计算复现性引入的不确定度分量(表5)为：

$$u_R = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{9}(\bar{l}_j - \bar{\bar{l}})^2}{10-1}} = 0.012\ 2\ \mathrm{mm}$$

表5　尺寸测量的不确定度分量

不确定度来源	评定结果/mm
偏移误差 u_B	0.017 4
重复性 u_r	0.000 674
分辨力 u_{RE}	0.006 53
复现性 u_R	0.012 2

3.3　不确定度分析评定结果

1)GUM法与AMCM评定结果

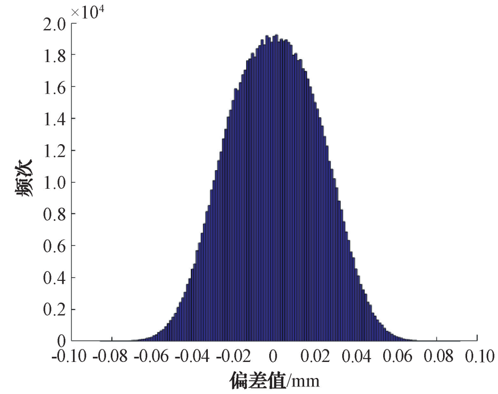
根据式(14)，按照方差合成定理的方法可计算出尺寸测量的合成标准不确定度为：

$u_c = \sqrt{u_B^2 + \max(u_{RE}^2, u_r^2) + u_R^2} = \sqrt{u_B^2 + u_{RE}^2 + u_R^2} = 0.022\ \mathrm{mm}$

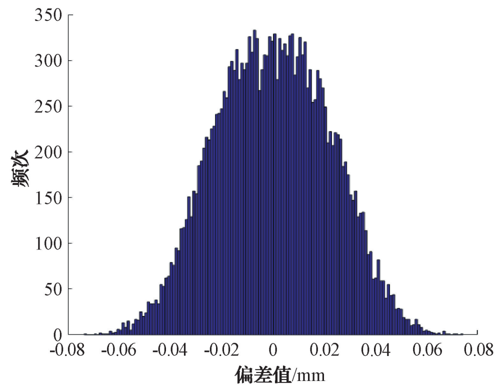
依据GUM方法取 $p=95\%$ 时 $k=2$，则扩展不确定度为：

$U = k \cdot u_c = 0.044\ \mathrm{mm}$

同时进行基于MCM的不确定度评定仿真，偏移服从均匀分布，分布区间为[−0.030 1 mm，0.030 1 mm]；分辨力服从三角分布，分布区间为[−0.016 mm，0.016 mm]；复现性服从正态分布，期望为0，标准差为0.012 2 mm。借助MATLAB软件分别对偏移、分辨力、复现性引入的不确定度进行 10^6 次随机模拟抽样，并将抽样结果代数和相加得到测量误差值的仿真结果，按照式(16)计算仿真结果的合成不确定度为 $u_c=0.022$ mm。MATLAB仿真结果直方图如图14所示，取包含概率为 $p=95\%$，得到包含区间为[−0.041 9 mm，0.042 0 mm]，扩展不确定为0.042 mm，包含因子 $k=U/u_c=1.9$。借助MATLAB软件编写并运行AMCM，得到合成不确定度为 $u_c=0.022$ mm，包含区间为[−0.042 3 mm，0.041 7 mm]，扩展不确定为0.042 mm，与MCM方法是一致的，但是运行次数只要 2×10^4。两种方法评定结果的比较如表6所示。



(a) MCM尺寸测量评定结果直方图



(b) AMCM尺寸测量评定结果直方图

图14　MATLAB仿真结果直方图

表6　尺寸测量的不确定度评定结果比较

不确定度评定方法		标准不确定度	扩展不确定度		
GUM		u_c	U	包含概率 p	包含因子 k
		0.022 mm	0.044 mm	95%	2
MCM	运行次数	u_c	U	包含概率 p	包含因子 k
	10^6	0.022 mm	0.042 mm	95%	1.9
AMCM	运行次数	u_c	U	包含概率 p	包含因子 k
	2×10^4	0.022 mm	0.042 mm	95%	1.9

2)AMCM验证GUM框架适用性

将GUM法得到的测量不确定度保留两位有效数字，把 $u(y)$ 表示为 22×10^{-3} 的形式，则数值容差取：

$$\delta = \frac{1}{2}10^{-3} = 0.000\ 5$$

代入式(17)、(18)计算两个包含区间各自端点的绝对差值：

$d_{low} = |y - U_p - y_{low}| = |-0.044\ 0-(-0.042\ 0)| = 0.002\ 0$

$d_{high} = |y + U_p - y_{high}| = |0.044\ 0 - 0.041\ 9| = 0.002\ 1$

从计算结果看出，d_{low}、d_{high} 皆大于 δ，说明GUM法未通过验证。但若将测量不确定度保留1位有效数字，把 $u(y)=0.02$ 表示为 2×10^{-2} 的形式，则数值容差取：

$$\delta = \frac{1}{2}10^{-2} = 0.005$$

同样地,代入式(17)、(18)计算两个包含区间各自端点的绝对差值:

$$d_{low} = |y - U_p - y_{low}| = |-0.044 - (-0.042)| = 0.002$$

$$d_{high} = |y + U_p - y_{high}| = |0.044 - 0.042| = 0.002$$

从计算结果看出,d_{low}、d_{high} 皆小于δ,说明 GUM 法通过验证。

4 结 论

本文基于经典误差理论,结合测量系统分析方法、自适应蒙特卡洛方法,研究了通用的、易行的面结构光测量系统不确定度评定的方法。从面结构光测量系统尺寸测量实例结果可以看出,AMCM 与 GUM 法的合成标准不确定度评定结果在保留常用的两位有效数字时是一致的,但是在相同置信概率下扩展不确定度的求取存在差异,AMCM 得到的扩展不确定度比 GUM 方法得到的扩展不确定度小 4.5%。GUM 方法计算扩展不确定度是假定测量结果符合正态分布,而从仿真结果的直方图来看,测量结果并不服从正态分布,而 AMCM 计算扩展不确定度是基于测量结果的分布,更为接近真实情况。在此情况下,为确定 GUM 框架是否适用,用 AMCM 对其进行验证。在不确定度保留一位有效数字时,两种方法在同样置信概率下的区间宽度差异仅是数值容差的 2/5,因此 GUM 法通过验证,说明 GUM 法依然适用;但是在不确定度保留两位有效数字时,两种方法在同样置信概率下的区间宽度差异却是数值容差的 4 倍,因此 GUM 法未能通过验证,这时应考虑使用 AMCM 或其他方法替代。

参 考 文 献

[1] 李维创,尹柏强.工业金属板带材表面缺陷自动视觉检测研究进展[J].电子测量与仪器学报,2021,35(6):1-16.

[2] 李响,何东钢.基于主动编码光源的单摄像机立体测量方法[J].电子测量技术,2022,45(2):13-21.

[3] LI W, HOU D, LUO Z, et al. 3D measurement system based on divergent multi-line structured light projection, its accuracy analysis [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2021, 231:166396.

[4] 李中伟. 面结构光三维测量技术[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2012.

[5] 李绒. 面结构光三维系统相位测量精度研究[D].成都:电子科技大学,2017.

[6] ZHANG Z, DAI J. Error analysis of a 3D imaging system based on fringe projection technique [J]. Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering, 2013, 9042(4):1066-1068.

[7] GAYTON G, ISA M, SU R, et al. Evaluating and propagating uncertainty in digital fringe projection systems [C]. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XII,2021.

[8] 万美婷. 基于面结构光的航空发动机叶片三维测量研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2012.

[9] 李哲,卢健,杨腾飞.基于深度学习的三维点云重建方法[J].国外电子测量技术,2021,40(3):1-5.

[10] 李茂月,马康盛,王飞,等.基于结构光在机测量的叶片点云预处理方法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(8):55-66.

[11] BERNAL C, DE AGUSTINA B, MARIN M M, et al. Accuracy analysis of fringe projection systems based on blue light technology[J]. Key Engineering Materials, 2014, 615:9-14.

[12] 傅世强. 面向光学三维测量的相位展开关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.

[13] SU F. The research of optical 3D measuring precision influencing factor in reverse engineering[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 33:157-162.

[14] 范弘悦. 基于 ATOS 的复杂目标三维检测与逆向技术研究[D]. 长春:长春理工大学, 2019.

[15] 程银宝.现代不确定度理论及应用研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2017.

[16] 王中宇,陈晓怀,吕京. 测量系统不确定度评定及其应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2019.

[17] VDI/VDE 2634-Part 3, Optical 3-D measuring systems: Multiple view systems based on area scanning[S]. 2008.

[18] JJF 1059.1—2021, 测量不确定度评定与表示[S].2021.

[19] GB/T 27419—2018,测量不确定度评定和表示 补充文件 1: 基于蒙特卡洛方法的分布传播[S].2018.

作 者 简 介

李双,硕士研究生,主要研究方向为测试计量技术与仪器。

E-mail:lishuangplus@buaa.edu.cn

王中宇,教授,博士生导师,主要研究方向为测量误差及不确定度评估。