

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106821

手持式激光扫描仪测量不确定度的蒙特卡洛法评定*

关静宇 王中宇 李 双

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 北京 100191)

摘要: 手持式三维激光扫描仪在测量过程中受多种误差因素的综合影响,使得采集得到的点云存在一定偏差,影响最终测量结果的准确性,因此需要对测量结果的不确定度进行评定。根据扫描仪的工作原理,对扫描过程中产生的不确定度来源进行详细分析,采用量值特性分析的方法建立不确定度模型,分别采用 GUM、蒙特卡洛(MCM)和自适应蒙特卡洛(AMCM)3种方法进行不确定度评定。通过对测量平板平面度实验所作的不确定度评定结果表明,MCM方法充分考虑了输入量的分布类型,不确定度评定的结果比 GUM 方法更加准确;AMCM 方法则能够有效地平衡抽样次数 M 的取值过大或过小的矛盾,测量不确定度评定的过程比 GUM 和 MCM 两种方法更加便捷和高效。

关键词: 手持式三维激光扫描仪;量值特性;自适应蒙特卡洛法;不确定度;评定

中图分类号: TB92 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1099

Monte Carlo assessment of measurement uncertainty for handheld laser scanners

Guan Jingyu Wang Zhongyu Li Shuang

(School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The hand-held 3D laser scanner is affected by a variety of error factors, which makes the collected point cloud and the accuracy of the final measurement results, so the result needs to evaluate the uncertainty of the measurement results. According to the working principle of the scanner, the source analyzed the uncertainty, establish the uncertainty model and evaluate GUM, MCM and adaptive AMCM. The uncertainty evaluation results of the measurement plate planness experiment show that the MCM method fully considers the distribution type of input quantity, and the uncertainty evaluation result is more accurate than the GUM method, the AMCM method can effectively balance the contradiction of sampling number M too large or too small, and the process of measurement uncertainty evaluation is more convenient and efficient than the GUM and MCM methods.

Keywords: hand-held 3D laser scanner; quantitative characteristic; adaptive Monte Carlo method; uncertainty; evaluation

0 引 言

三维激光扫描技术通过高速激光扫描测量方法,快速地获取被测对象表面三维点云信息从而建立三维模型^[1]。三维激光扫描仪通过对物体表面扫描测量,得到被测物体的三维点云信息,并利用软件进行数据分析,得到物体表面的测量结果。其中手持式三维激光扫描仪通过手持移动获取点云数据,具有灵活便携的特点和自定位的功能。在扫描过程中的自动配准大大提高了工作效率,因此广泛应用于医学^[2]、建筑修复^[3]和文物保护^[4]等众多领域。

在激光扫描的过程中,由于受到多种误差因素的影响,扫描采集得到的三维点云数据不可避免地存在偏差^[5],点

云偏差将直接反映在测量结果中,进而造成测量误差。随着测量不确定度表示指南(GUM)的推广应用,用不确定度替代测量误差,将成为计量标准的评定、检验实验室能力和产品质量的重要评价依据^[6]。

为了进一步提高三维扫描测量结果的可靠性和准确度,需要对扫描测量系统进行不确定度分析。本文全面分析了影响手持式三维激光扫描仪测量不确定度因素的来源;考虑到不确定度来源之间可能存在的独立性未知和传递规律难以确定等问题,直接从测量结果的量值特性出发,并且以平板的平面度测量为实例,结合 GUM、MCM 和 AMCM 3种方法分别进行不确定度的传递运算和结果评定,并且对 3种方法进行了比较,以便对测量结果进行合理

收稿日期:2021-06-01

* 基金项目:工信部民用飞机专项科研项目(MJ-2018-J-70)资助

地评定,更加客观地评估被测对象的性能指标是否满足要求^[7]。

1 测量不确定度分析

测量不确定度评定的整体流程如图1所示。

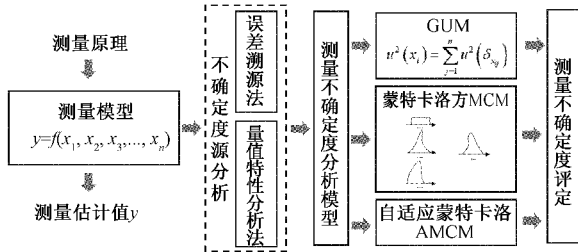


图1 测量不确定度评定的整体流程

不确定度溯源是测量不确定度评定过程中一个关键环节,下面分别使用两种方法对不同性质的不确定度来源进行合理溯源和有效分析。

1.1 误差溯源法

1)测量原理:采用激光测距法,由扫描仪发射激光到物体表面,记录入射光与反射光之间的夹角。已知激光源与CCD之间的基线长度,利用求解三角形的相关理论,得到空间特征点的三维坐标^[8]。

2)不确定度影响因素分析:主要由扫描仪自身、扫描目标反射面、边缘效应和环境因素等引起,具体影响^[9]如表1所示。

表1 不确定度影响因素分析

| 不确定因素 | 具体影响 |
|---------|---|
| 扫描仪自身 | CCD相机镜头存在的各种像差。 光敏元的尺寸大小以及之间的间隔。 光强分布不均,成像中心偏离。 光斑光能质心与光斑的集合中心不重合。 |
| 扫描目标反射面 | 反射面倾斜影响,接收的激光分布不均。 反射面粗糙程度影响,光斑形状变化。 反射面颜色影响,产生不同光谱信号。 |
| 边缘效应 | 接收到的反射信号是多个表面的反射能量集合,与实际扫描目标发生偏差。 |
| 环境 | 温度、湿度、气压等环境影响光在空气中的传播。 |

1.2 量值特性分析法

在第1.1节中分析了不确定度来源,为了避免溯源繁杂的问题,可以直接利用测量结果的统计特性给出不确定度分量^[10],主要包括重复性、复现性、分辨力、稳定性、偏移和线性^[11]。针对测量目的和侧重点的不同,可以选定其中的几项作为量值特性分析的主要指标,例如偏移和线性对其测量结果的影响体现在扫描仪自身误差引入的不确定

度^[12];分辨力和重复性存在一定关联性,应当考虑重复性引入的不确定度分量^[13];复现性引入的不确定度分量也应考虑^[14]。

基于量值特性得到不确定度的分析模型^[15]为:

$$y = f(x, \Delta, \sigma_1, \sigma_2) \quad (1)$$

式中: y 为测量值; x 为测量值的参考值; Δ 为示值误差; σ_1 为重复性误差; σ_2 为复现性误差。

2 不确定度数学建模

1)示值误差引入的不确定度分量^[13]为:

$$u_E = \frac{MPE_E}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

式中: MPE_E 为最大允许示值误差。

2)重复性引入的不确定度分量

当以 N 次测量的平均值作为最佳估计值时,引入的不确定度分量^[14]为:

$$u_r = \sqrt{\frac{1}{N(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

式中: n 为重复性测量的次数; y_i 为第 i 次测量测量值; \bar{y} 为重复测量列的平均值。

3)复现性引入的不确定度分量

由不同测量人员进行 m 组独立的重复测量所引入的不确定度为:

$$u_R = \sqrt{\frac{1}{(m-1)} \sum_{j=1}^m (\bar{y}_j - \bar{\bar{y}})^2} \quad (4)$$

式中: m 为独立重复测量的组数; \bar{y}_j 为每组重复测量的平均值; $\bar{\bar{y}}$ 为 m 组测量列的平均值。

2.1 GUM

基于方差合成定理的测量不确定度评定模型为:

$$u_c = \sqrt{u_E^2 + u_r^2 + u_R^2} \quad (5)$$

如果取 $p=95\%$, $k=2$,则扩展不确定度为:

$$U = ku_c \quad (6)$$

2.2 MCM

MCM在于构造概率模型和随机抽样,可直接得出模型输出量的概率分布,将MCM引入测量不确定度评定中可以有效地弥补GUM存在的不足,其整体流程如图2所示,实施步骤^[15]如下。

1)选择蒙特卡洛实验的次数 M ;

2)在输入量 X 中进行抽样,产生 M 个向量;

3)对于每个向量,通过模型计算得出输出量 Y 相应的值,生成 M 个模型;

4)把 M 个模型值按严格递增的顺序排列,用排列后的模型值组成 G ;

5)得到 Y 的最佳估计 y 及其标准不确定度 $u(y)$;

6)根据包含概率 p ,给出 Y 适当的包含区间。

2.3 AMCM

抽样次数 M 的确定直接影响着评定结果的可靠性及

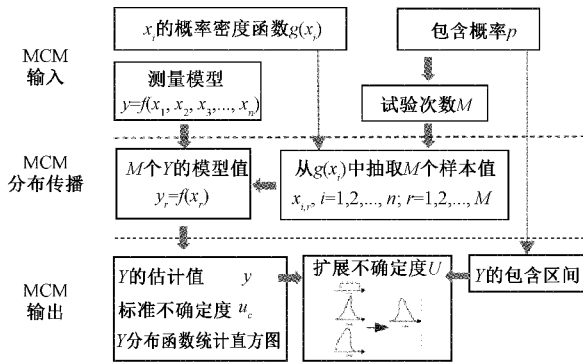


图 2 MCM 计算流程

仿真的效果^[16]。随着抽样次数 M 的增加,输出量的各种指标值在越来越精确的同时,需要的计算时间也越来越长,有时甚至于无法实现。可以采用自适应蒙特卡洛法来解决这个矛盾。在执行 AMCM 的整个过程中,蒙特卡洛执行次数不断增加,直至所需要的结果达到统计意义上的稳定,即某结果的 2 倍标准偏差小于标准不确定度的数值容差^[17]。

采用 AMCM 进行不确定度评定的整体流程如图 3 所示,具体步骤^[18]如下。

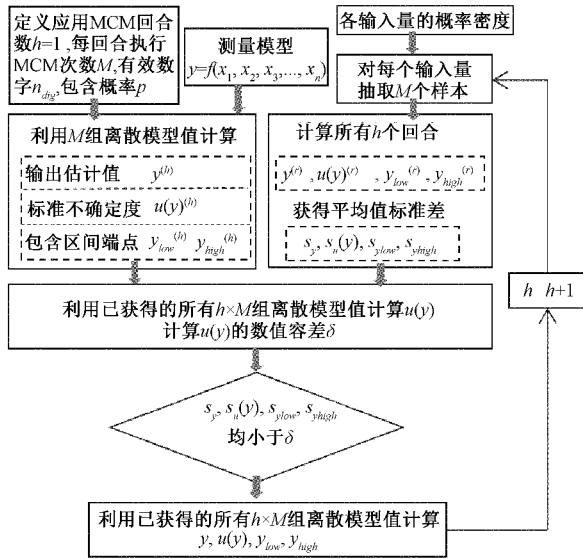


图 3 AMCM 计算流程

- 1) 设 n_{dig} 为一个适当小的正整数;
- 2) 设 $M = \max(J, 10^4)$, 其中 J 是大于或等于 $100/(1-p)$ 的最小整数;
- 3) 设 $h=1$, 表示第 1 次使用 MCM 仿真;
- 4) 运行 M 次蒙特卡洛实验;
- 5) 由得到的 M 个模型值 y_1, \dots, y_M , 计算得到序列中的第 h 个 $y^{(r)}, u(y)^{(r)}, y_{low}^{(r)}, y_{high}^{(r)}$ 分别作为 Y 的估计值、标准不确定度以及 $100p\%$ 包含概率下的包含区间的左右端点。
- 6) 若 $h=1$, 令 $h=h+1$ 并返回步骤 4);

7) 得到与 $y^{(1)}, \dots, y^{(h)}$ 的平均值相关联的标准偏差为:

$$s_y^2 = \frac{1}{h(h-1)} \sum_{r=1}^h (y^{(r)} - \bar{y})^2 \quad (7)$$

式中: $\bar{y} = \frac{1}{h} \sum_{r=1}^h y^{(r)}$

- 8) 计算统计量 $u(y), y_{low}, y_{high}$ 所对应的统计量;
- 9) 用所有 $h \times M$ 个模型值计算 $u(y)$;
- 10) 计算 $u(y)$ 的数值容差 δ ;
- 11) 若 $s_y, s_u(y), s_{y_{low}}, s_{y_{high}}$ 中存在一个值大于 $\delta/2$, 则令 $h=h+1$ 并返回步骤 4);
- 12) 若整个计算过程稳定, 用得到的所有 $h \times M$ 个模型值计算 $y, u(y)$ 和 $100p\%$ 包含区间。

3 实验分析

3.1 测量实验

采用 HandySCAN700 手持式三维激光扫描仪进行测量实验, 如图 4 所示, 并且完成测量不确定度的评定。

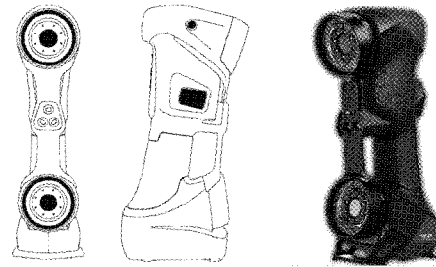


图 4 HandySCAN700 手持式三维激光扫描仪

1) 构建稳定的扫描环境: 测量环境温度为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, 湿度小于 60% , 减少环境因素的影响。

2) 激光扫描仪校准: 按照设备制造说明严格执行, 扫描仪必须指向校准板中心即圆圈所示的位置, 并将红线(扫描仪的高度和方向)对齐到绿色矩形内^[9], 其校准软件显示如图 5 所示, 操作过程如图 6 所示。

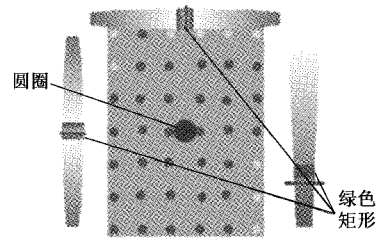


图 5 校准软件显示

3) 测量对象: 测量范围为 $450 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 平面度为 $10 \mu\text{m}$ 的哑光陶瓷平板, 在平板周围不规则地贴上标定点, 扫描过程及结果如图 7 所示。

4) 将得到的三维点云数据, 导入三维数据处理软件 Polyworks 中, 进行相关特征的创建及数据测量工作, 首先对平面上的点拟合出平面特征, 然后将点云数据进行分析处理, 得到其平面度^[19]。

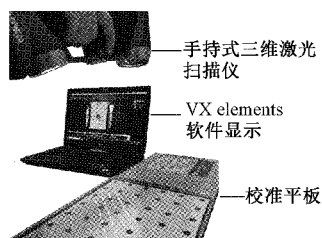


图6 校准操作

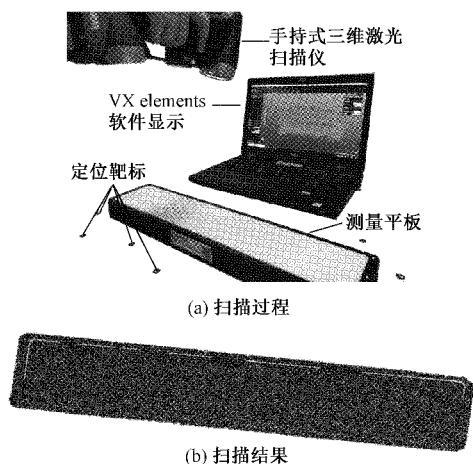


图7 扫描过程及结果

3.2 测量结果

平板平面度的重复性测量数据如表2所示。

表2 重复性测量数据

| 测量次数 | 测量值/mm |
|------|--------|
| 1 | 0.048 |
| 2 | 0.056 |
| 3 | 0.046 |
| 4 | 0.067 |
| 5 | 0.056 |
| 6 | 0.051 |
| 7 | 0.053 |
| 8 | 0.046 |
| 9 | 0.034 |
| 10 | 0.038 |

复现性测量数据如表3所示。

3.3 评定结果比较

1) GUM

示值误差引入的不确定度分量通过式(2)计算得 $u_E = 0.0329$ mm, 重复性引入的不确定度分量通过式(3)计算得 $u_r = 0.00284$ mm, 复现性引入的不确定度分量通过式(4)计算得 $u_R = 0.00152$ mm。通过式(5)得合成标准不确定度为 $u_c = 0.0331$ mm, 式(6)扩展不确定度为 $U = 0.0662$ mm。

表3 复现性测量数据

| 测量人员 | 测量组数 | 重复实验平均值/mm |
|--------|---------|------------|
| 测量人员 A | 第 I 组 | 0.049 5 |
| | 第 II 组 | 0.048 3 |
| | 第 III 组 | 0.051 7 |
| 测量人员 B | 第 I 组 | 0.047 4 |
| | 第 II 组 | 0.052 7 |
| | 第 III 组 | 0.056 4 |
| 测量人员 C | 第 I 组 | 0.052 2 |
| | 第 II 组 | 0.046 9 |
| | 第 III 组 | 0.048 8 |

2) MCM

平面度测量的示值误差服从区间为 $[-0.057$ mm, 0.057 mm] 的均匀分布; 重复性服从期望为 0, 标准差为 0.00284 mm 的正态分布; 复现性服从期望为 0, 标准差为 0.00152 mm 的正态分布。

利用 MATLAB 软件分别进行 10^4 和 10^6 次随机模拟抽样, 将 3 组抽样值的代数和相加, 利用 MATLAB 软件得到标准不确定度、包含区间、扩展不确定度和包含因子 k , 如表 4 所示。

3) AMCM

根据 AMCM 的计算流程, 得到 3 个不确定度分量的计算结果, 且通过 MATLAB 绘制仿真结果的分布直方图^[20]如图 8 所示。

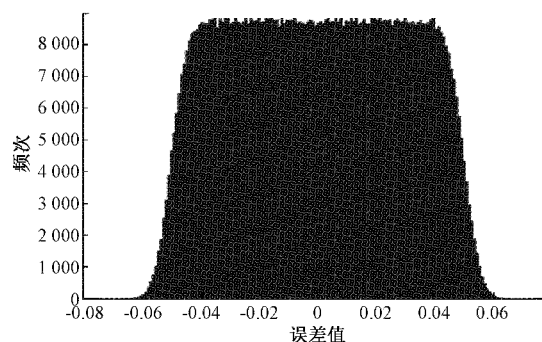


图8 利用 MATLAB 模拟的误差统计直方图

基于 GUM、MCM 和 AMCM 评定出的测量不确定度的结果如表 4 所示。

表4 不确定度评定结果的比较

| 方法 | 标准不确定度 | | 扩展不确定度 | |
|-----------------|-----------|---------|-----------------|--------------|
| | u_c /mm | U /mm | 包含 概率 $p/\%$ | 包含 因子 k |
| GUM | 0.033 1 | 0.066 2 | 95 | 2 |
| MCM($M=10^4$) | 0.033 1 | 0.054 5 | 95 | 1.646 5 |
| MCM($M=10^6$) | 0.033 1 | 0.054 6 | 95 | 1.649 5 |
| AMCM | 0.033 1 | 0.054 6 | 95 | 1.649 5 |

比较不确定度的评定结果可知,在采用量值特性分析时,假定不确定度分量之间相互独立,根据 GUM 方法计算标准不确定度时可忽略相关性造成的影响,故由 GUM、MCM 和 AMCM 方法得到的标准不确定度 u_c 基本一致。

在采用 GUM 方法时,其默认的输出量服从 t 分布或正态分布,根据 GUM 得到的扩展不确定度 $U_{95}=0.0662$, $k=2$,与 MCM 计算得到的客观量值 $U_{95}=0.0546$, $k=1.65$ 相比较,人为地扩大了 21%,因此用 $U_{95}=0.0662$, $k=2$ 赋予输出量 Y 的分散性不合理。由于输入量的分布类型具有多样性,根据 GUM 方法计算得到的扩展不确定度,与 MCM 客观计算得到的扩展不确定度相比较有所增大。

MCM 利用足够大量的数值进行模拟采样来达到获取被测量真实分布的情况。关于抽样次数的选择,自适应 MCM 与传统蒙特卡洛方法相比较更加便捷。当抽样次数 M 小于达到统计意义上的稳定值 M 时,输出量的标准不确定度与扩展不确定度不够精确;当 M 的取值较大时,计算所消耗的时间较长甚至于无法计算。由于每次模拟采样均存在着随机性,导致不确定度的评定结果有轻微的偏差,这也是自适应 MCM 评定测量不确定度需要进一步进行优化的努力方向。

4 结 论

针对判断手持式三维激光扫描仪测量结果的可靠性和准确度的问题,分析了测量原理,通过误差溯源法分析了其不确定度的影响因素,为了避免繁杂的不确定度溯源,采用量值特性的方法对不确定度进行分析;建立了测量不确定度的数学模型,分别通过 GUM、MCM 和 AMCM 3 种方法进行不确定度的传递与合成运算,完成了手持式三维激光扫描仪测量平板平面度的不确定度评定。针对评定结果比较分析 MCM 充分地考虑了输入量的分布类型,在不确定度评定中具有一定的优势;自适应 MCM 方法能够有效地解决抽样次数 M 取值过大或过小的矛盾,因此它的测量不确定度评定过程与 MCM 相比较更加便捷并且高效,然而每次模拟采样的随机性会使评定结果有微小偏差,这也是之后评定需要优化的方向。

参考文献

- [1] 贺健. 三维激光扫描测量系统的应用及解析[J]. 中国新技术新产品, 2019(21):15-16.
- [2] 张永红,侯贺,韩玉川,等. 三维激光扫描技术在医学表面测绘中的应用进展[J]. 生物医学工程学, 2016, 33(2): 373-377.
- [3] LIU K, MA J. Digital documentation of cultural heritage: Orthographic map with 3d laser scanner research of the garden of harmonious interests [J]. Agro Food Industry Hi-Tech, 2017, 28(3): 2109-2114.
- [4] TANG J Y, ZHANG Z, LIN M Y, et al. Research on

the application of 3D scanning and 3D printing in the reproduction of fine bronze cultural relics [C]. The 2019 International Conference, 2019, DOI: 10.1145/3366194.3366241.

- [5] 陈凯. 三维激光扫描仪及其测量误差影响因素分析[J]. 资源信息与工程, 2017, 32(5): 153-154.
- [6] 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.
- [7] WANG Q, ZISSLER N, HOLDEN R. Evaluate error sources and uncertainty in large scale measurement systems [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(1): 1-11.
- [8] 卞柳. 手持激光扫描仪测量精度评定方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2020.
- [9] 韩雨萌. 大型复杂零件的三维扫描测量精度研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- [10] 王汉斌, 陈晓怀, 程银宝, 等. 基于新一代 GPS 的产品检验符合性不确定度评定[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 194-200.
- [11] 郝宗发. 测量系统分析(MSA)实施方法的思考[J]. 质量与认证, 2019(9): 65-66.
- [12] 王汉斌. CMM 平面度测量不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(3): 98-99.
- [13] POLO M E, FELICISIMO A M. Analysis of uncertainty and repeatability of a low-cost 3D laser scanner [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2012, 12(7): 9046-9054.
- [14] 程银宝, 陈晓怀, 王汉斌, 等. 基于精度理论的测量不确定度评定与分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8): 1175-1182.
- [15] 张婉洁, 赵轶. 蒙特卡洛法测量不确定度评定中测量模型的建立[J]. 计量与测试技术, 2017, 44(9): 56-57, 59.
- [16] 张孝军, 程银宝, 吴军, 等. 自适应蒙特卡洛法评定量块校准测量不确定度[J]. 电子测量技术, 2020, 43(20): 84-88.
- [17] 牛恒, 牛娜. 自适应蒙特卡洛法在测量不确定度评定中的应用[J]. 宁夏工程技术, 2019, 18(1): 72-75, 85.
- [18] 闻春华. MCM 在两种关系模型测量不确定度评定中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(11): 39-44.
- [19] 李毅, 徐超, 廖开星, 等. 手持式三维激光扫描仪在工业构件质量检测中的应用[J]. 测绘通报, 2019(8): 102-105.
- [20] LI H L, CHEN X H, CHENG Y B, et al. Uncertainty modeling and evaluation of CMM task oriented measurement based on SVCMM [J]. Measurement Science Review, 2017, 17(5): 226-231.

作者简介

关静宇, 硕士研究生, 主要研究方向为测试计量技术与仪器。

E-mail: guanjingyu0604@163.com