

接触式轮廓扫描仪系统标定算法*

高彤¹,陈鸿¹,张亮²,王晋祺³

(1.中北大学 电子测试技术重点实验室 仪器科学与动态测试教育部重点实验室,山西 太原 030051;

2.太原科技大学 交通与物流学院,山西 太原 030051;3.上海无线电设备研究所,上海 201109)

摘要: 接触式轮廓扫描仪其原理是利用编码器返回的长度序列以及旋转平台的旋转角度来确定被测物体的轮廓坐标,由于检测钩的起始点与旋转平台中心不重合,导致直接利用所测数据绘制出的轮廓不准确。为解决这个误差,提出一种不需要建立系统的精准误差模型,而是利用测量尺寸已知的正方形标定板所得到的数据去获取系统参数,进而对轮廓坐标进行在线标定的方法。通过编程模拟仿真了测量过程,并将获取到的参数与理想参数值进行比较,模拟数据表明该算法可以使测量误差控制在 0.5 mm 以下,角度误差控制在 0.1°以下,符合设备的精度要求,可以快速还原被测图形的真实轮廓。

关键词: 接触式测量;坐标标定;最小二乘法;拟合;标定模型

中图分类号: TN919.5 ; TB92

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.200654

中文引用格式: 高彤,陈鸿,张亮,等. 接触式轮廓扫描仪系统标定算法[J]. 电子技术应用, 2021, 47(3):65–70, 74.

英文引用格式: Gao Tong, Chen Hong, Zhang Liang, et al. Calibration algorithm of contact contour scanner system[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(3):65–70, 74.

Calibration algorithm of contact contour scanner system

Gao Tong¹, Chen Hong¹, Zhang Liang², Wang Jinqi³

(1.State Key Laboratory of Electronic Test Technology, Key Lab of Instrument Science and Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2.College of Transportation and Logistics, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030051, China;
3.Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: The principle of the contact contour scanner is to use the length sequence returned by the encoder and the rotation angle of the rotating platform to determine the contour coordinates of the object to be measured. Since the starting point of the detection hook does not coincide with the center of the rotating platform, it leads to the contour drawn directly from the measured data is not accurate. In order to solve this error, this paper proposes a method that does not need to establish the precise error model of the system, but to obtain system parameters by using the data obtained from the square calibration plate with known measurement size, and then calibrates the contour coordinates online. The measurement process was simulated through programming and the parameters obtained were compared with the ideal parameter values. The simulation data showed that the algorithm could control the measurement error below 0.5 mm and the angle error below 0.1°, which met the accuracy requirements of the equipment and could restore the real contour of the graph under test.

Key words: contact measurement; coordinate calibration; least squares; fitting; the calibration model

0 引言

现如今检测技术朝着精密、高效的方向不断提升,眼镜的生产和加工也向着高精度、自动化方向发展。传统的方法需要定制相应的模板,工序复杂,耗时长,而且精度不高^[1],不满足工业生产需求。目前国内普遍使用镜片自动磨边机,它是一种根据轮廓扫描仪所提供的轮廓数据进行自动加工镜片的设备,实现镜架凹槽或镜

片轮廓参数的获取并传给数控磨边机从而实现加工全自动。测量轮廓的方式主要分为接触式测量和非接触式测量。接触式测量利用扫描探针与被测物体接触,使扫描探针或被测物体旋转一周,实现对被测物体进行离散的空间点位置的获取,通过一定的数学计算,完成对所测数据点的分析拟合,最终还原出被测物体的轮廓;非接触测量有超声波法以及基于视觉技术的激光三角法、结构光法等^[2-4],但利用光学的测量方式不适用于镜架凹槽。本文所研究的接触式探针扫描仪利用低压力接触

* 基金项目:山西省重点研发计划项目(201903D121060, 201903D121118)

式探针扫描镜架内凹槽或镜片边缘轮廓，其扫描原理就是利用检测探针接触被测物体一周的过程中得到旋转编码器返回的长度序列以及旋转平台的旋转角度来确定轮廓的坐标信息，编码器记录的长度是检测探针升起位置到被测物体轮廓边缘点的距离。实际工程中，由于仪器零部件的安装不精准，检测探针的零点与旋转中心往往不重合，所以需要对得到的数据进行处理才能得到准确的曲线轮廓^[5]。对于此类系统误差问题，一般做法是对误差来源进行分析后，需要建立误差的精准数学模型，提出系统误差补偿或抑制方法^[6-9]。为了解决本文研究的问题，参考文献[10]提出的方法是对误差进行了精确建模，建立系统的误差数学模型，运用最小二乘法的基本原理求解最佳参数^[10-12]，但这种方法运算量较大，难以实现在线标定^[13]。本文提出一种利用尺寸已知的正方形标定板，通过测量标定板得到的数据来获取到系统参数，从而对被测物体的轮廓坐标进行在线标定。并通过Qt Creator软件编程模拟仿真了测量过程验证了算法的准确性。

1 扫描测量原理及误差产生原因

应用极坐标系下的构图原理，如图1所示，以滑轨的初始位置为极坐标轴建立坐标系，坐标原点O为检测钩升起的位置，旋转编码器记录由检测钩起始点到测量边缘点P₁的长度ρ₁。当检测钩所在的滑轨每旋转一个角度Δθ，则有与之相对应的长度序列。实际测量中，只要能够获得被测对象轮廓一周无穷多个位置的坐标(ρ, θ)，即可得到所需轮廓。

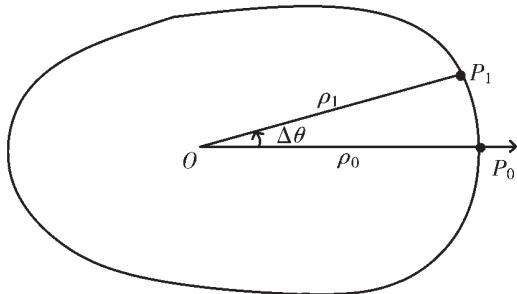


图1 测量原理图

误差产生原因：由扫描原理可知，测量点的起始测量位置须是一个定点，这样得到的数据才准确，而实际测量中由于扫描部件的安装会有偏差，导致检测钩的起始点与旋转中心点不重合，进而导致检测钩起始点在测量过程中是随旋转平台绕旋转中心而变化的，并非定点。旋转中心到检测钩所在滑轨存在垂直距离，用这样得到的数据直接去拟合轮廓不可行，所以在正式测量镜框前需要对测量系统进行标定。

2 测量系统坐标标定算法

2.1 建立标定模型

建立合适的坐标系对于问题的求解非常关键，图2所示是将被测镜框固定在卡槽测量镜框镜圈。



图2 镜框/镜片扫描仪

为了便于说明测量结果及计算，建立如图3所示的测量坐标系，其原点O为旋转中心，两条坐标轴x轴和y轴的方向为卡槽的两组对边方向。为了获取系统参数，这里采用带有4个圆角的正方形标定板，将正方形标定板固定在卡槽内，标定板的边长方向与卡槽的两种组对边方向一致，将与第一条被测边长垂直的坐标轴定为x轴正方向，按逆时针方向旋转；将与第二条被测边长垂直的坐标轴定为y轴正方向。Q为检测钩起始点，M为旋转中心到检测钩所在滑轨的垂心，P为测量点。将QM的值设为ΔL，OM的值设为d。

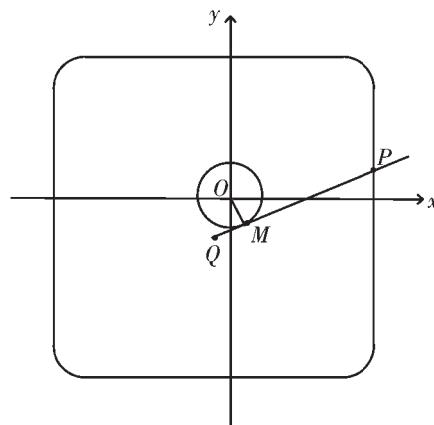


图3 测量坐标系

2.2 测量系统参数标定

由于 $\rho = QM + MP = \Delta L + \sqrt{OP^2 - d^2}$ ，假设测量过程是连续采点，当检测钩运动到正方形边长与坐标轴的交点位置时，OP为测量此条边长的最小值，则P为测量此条边长的最小值点。将测量得到的4个极小值点按逆时针顺序定为P₀、P₁、P₂、P₃，这4个极小值点在测量坐标系中的位置可由测量结果确定。因为当滑轨运动到正方形标定板拐弯处时会得到测量极大值，所以当输出数据显示先得到一个极小值时说明P₀点位于第1条被测边长与x轴的交点；反之，当先得到一个极大值时，说明P₀点位于第2条被测边长与y轴的交点。P₀点位置确定后，其余3个极小值点在测量坐标系中的位置也就确定。将4个极小值点的数据按对边分为两组，即P₀、P₂一组，P₁、P₃一组。

下面选取一种位置情况进行说明，如图4所示的参数标定模型中，设选取的一组极小值点的位置如图中的P₀、P₂。测量点是P₀位置时，设滑轨与x轴的夹角为θ₀，

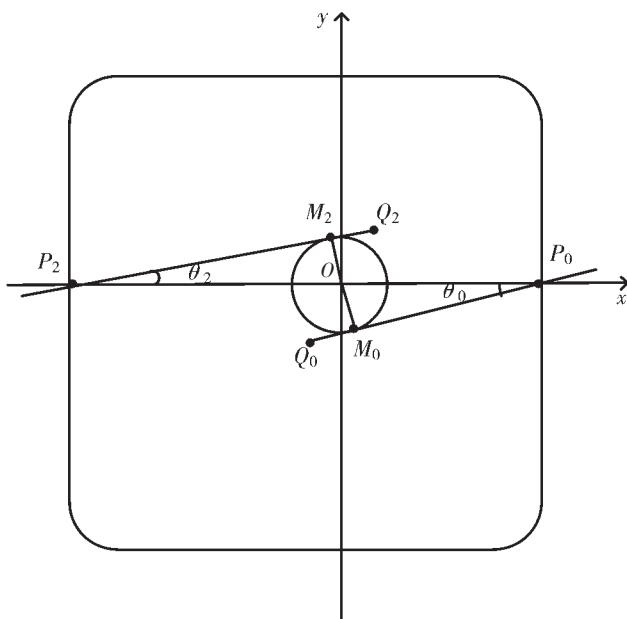


图 4 参数标定模型

即 $\angle OP_0M_0 = \theta_0$, 其对边极小测量点为 P_2 , 设滑轨与 x 轴夹角为 θ_2 , 即 $\angle OP_2M_2 = \theta_2$ 。在这里不作正负区分, 本文规定从 x 轴正半轴逆时针旋转而成的角为正角。

已知正方形标定板的边长 $L=45$ mm, 从测量数据可以确定 O_0P_0 以及 Q_2P_2 的长度分别设为 ρ_0 和 ρ_2 , 从测量数据还可以确定滑轨由测量 P_0 点逆时针旋转到测量 P_2 点所用的旋转角度 $\Delta\theta$ 。则可列出以下方程:

$$\rho_0 = Q_0M_0 + M_0P_0 = \Delta L + \frac{d}{\tan\theta_0} \quad (1)$$

$$\rho_2 = Q_2M_2 + M_2P_2 = \Delta L + \frac{d}{\tan\theta_2} \quad (2)$$

$$\Delta\theta - \theta_2 + \theta_0 = \pi \quad (3)$$

$$\frac{OM_0}{\sin\theta_0} + \frac{OM_2}{\sin\theta_2} = d \left(\frac{1}{\sin\theta_0} + \frac{1}{\sin\theta_2} \right) = L \quad (4)$$

式(1)-式(2)得:

$$d \left(\frac{\cos\theta_0}{\sin\theta_0} + \frac{\cos\theta_2}{\sin\theta_2} \right) = \rho_0 - \rho_2 \quad (5)$$

记 $\rho_0 - \rho_2 = \Delta\rho$, 并将式(3)带入式(5)得:

$$d = \frac{\sin\theta_0 \sin(\Delta\theta + \theta_0)}{\cos\theta_0 \sin(\Delta\theta + \theta_0) - \sin\theta_0 \cos(\Delta\theta + \theta_0)} \Delta\rho \quad (6)$$

将式(6)带入式(4)得:

$$\frac{L}{\Delta\rho} = \frac{\sin(\Delta\theta + \theta_0) - \sin\theta_0}{\cos\theta_0 \sin(\Delta\theta + \theta_0) - \sin\theta_0 \cos(\Delta\theta + \theta_0)} \quad (7)$$

设 $\sin\theta_0 = x$, $\cos\theta_0 = \sqrt{1-x^2}$, 则式(7)变为:

$$\frac{L}{\Delta\rho} + \frac{1-\cos\Delta\theta}{\sin\Delta\theta} x = \sqrt{1-x^2} \quad (8)$$

由于 $\sin\theta_0$ 和 $\sin\theta_2$ 均是方程(8)的解, 且不相等, 将测量数据带入方程(8)解出 $\sin\theta_0$ 和 $\sin\theta_2$, 带入方程(4)即可解得 d 。从 ρ_0 和 ρ_2 的大小关系可以确定该方程的两个解与 θ_0 和 θ_2 的对应关系, 若 $\rho_0 > \rho_2$, 则 $\theta_0 < \theta_2$, 反之 $\theta_0 > \theta_2$, 从而确定 θ_0 和 θ_2 的值, 将其带回式(1)或式(2)即可解出

QM 的长度 ΔL 。

得到 θ_0 和 θ_2 的值后, 再加上 P_0 、 P_2 在标定模型中的位置确定, 即可确定检测钩在测量 P_0 、 P_2 点时滑轨与 x 轴正半轴的夹角。图 4 这种情况下, 在测量 P_0 点时, 滑轨与 x 轴正半轴的夹角就是 θ_0 。同理, 如果选取的一组数据是 P_1 、 P_3 , 得到滑轨在这两个测量点与 y 轴的夹角 θ_1 和 θ_3 , 则在测量 P_1 点时, 滑轨与 x 轴正半轴的夹角为 $\theta_1 + \pi/2$ 。

设滑轨在初始位置与 x 轴正半轴的夹角为 α_0 , 利用滑轨从初始位置逆时针旋转到测量极小值点的位置时的旋转角 $\Delta\alpha$, 以及检测钩在测量该极小值点时滑轨与 x 轴正半轴的夹角即可确定 α_0 。例如测量极小值点是图 4 的 P_0 点, 滑轨由初始位置转到测量 P_0 点位置所用的旋转角为 $\Delta\alpha$, 则 $\alpha_0 = \theta_0 - \Delta\alpha$ 。

2.3 测量系统坐标标定

获取到系统参数 d 、 ΔL 、滑轨在初始位置与 x 轴的夹角 α_0 后, 即可对测量点 P 的坐标进行标定。如图 5 坐标标定模型, 要确定任意测量点 P 的坐标, 则需要确定 OP 与 x 轴正半轴的夹角 β 以及 OP 的长度。测量 P 点时滑轨与 x 轴正半轴的夹角 α 可由 α_0 和旋转角 $\Delta\alpha$ 得到, 则:

$$OP = \sqrt{MP^2 + OM^2} = \sqrt{(\rho - \Delta L)^2 + d^2} \quad (9)$$

$$\beta = \alpha - \angle OPM = \alpha - \arctan \frac{d}{\rho - \Delta L} \quad (10)$$

P 点的直角坐标由极坐标到直角坐标系下的转换即可得 $P(OP\cos\beta, OP\sin\beta)$ 。

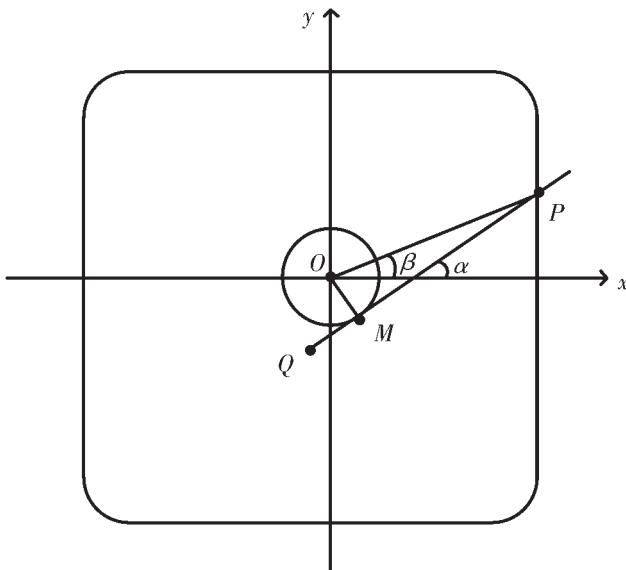


图 5 坐标标定模型

3 测量数据处理

根据上述分析, 测量正方形标定板的过程中如果采样点是连续的才会得到理想极小值点, 即边长与坐标轴交点。而实际工程测量中采样点是离散选取的。提高采样点数可以提高取到理想极小值点的概率, 本文所研究的接触式镜框扫描仪所能达到的角度分辨率最小为

0.225°, 即旋转一圈采样 1 600 个点, 在此分辨率下根据式(6)给定 ρ 、 θ_0 后绘制 $\Delta\theta$ 和 d 的关系图, 如图 6 所示, 显然 0.225°的角度分辨率达不到系统要求的 0.5 mm 精度。

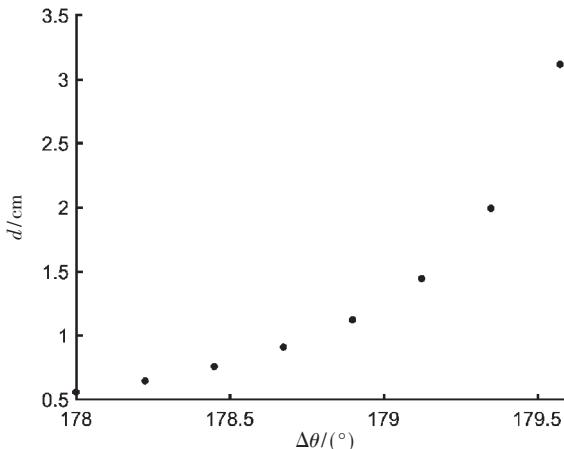


图 6 系统精度说明图

此外能否取到理想极小值点或者与理想极小值点接近的点还与滑轨的起始角度有关。故为了得到较为准确的极小点数据,有必要对测量数据进行处理,本文采取最小二乘法拟合,利用得到的 4 个极小值点及它们周围的采样点数据去拟合 4 条曲线,再用拟合得到的函数去确定所需要的极小值点数据。首先需要确定拟合函数模型,可绘制输出数据的波形图,根据曲线的形状选择合适的拟合函数 $f(x)$,然后选定一组数据 $\{(x_i, y_i), i=0, 1, 2, \dots, m\}$,求使得偏差平方和 $\sum_{i=0}^m [f(x_i) - y_i]^2$ 最小时的拟合函数表达式。

4 模拟仿真实验

为了验证标定算法,在给定正方形标定板、旋转中心与坐标系的相对位置关系后,利用 Qt Creator 软件编程模拟仿真出在给定系统参数 d 、 ΔL 、 α_0 下的数据。利用仿真出的数据用标定算法解出系统参数的值并于设定值进行比较,从而验证算法的准确性。

4.1 测量数据生成

当旋转中心和标定板的位置关系确定后,测量数据即可确定,与坐标系的位置无关。这里仍然设旋转中心为坐标点 $(0, 0)$,设旋转中心到垂心的连线与 x 轴正半轴所成夹角为 γ ,系统的角度分辨率为 $\varphi = 2\pi/n$ (n 为总采样点数), γ 的值可由系统角度分辨率和滑轨与 x 轴正半轴的初始夹角 α_0 确定,则滑轨运动到任意位置时,旋转中心到滑轨的垂心坐标为 $M(d\cos\gamma, d\sin\gamma)$ 。此时滑轨的斜率 $k=\tan(\gamma-\pi/2)$,则滑轨所在直线方程确定,利用该直线方程与被测点所在的标定板轮廓曲线或直线方程联立可得测量点 P 的坐标,求出 M 点到 P 点的距离再加上 ΔP 即仿真出测量长度值 ρ 。

将四角带有圆弧(半径为 r)的正方形标定板轮廓分为四部分,如图 7 所示,分别为测量点从 D_0 到 D_1 到

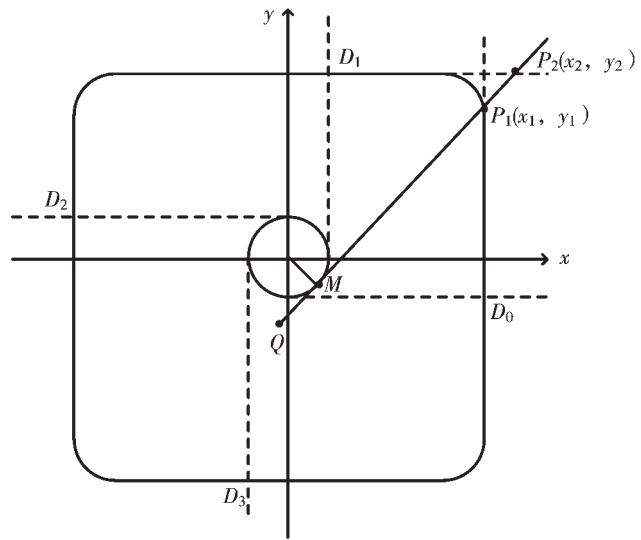


图 7 测量数据生成

D_2 、 D_2 到 D_3 以及 D_3 到 D_0 。

当测量点位于 D_0 到 D_1 范围时,与切线方程联立的方程分为直线 $x=x_1$ 和 $y=y_2$ 以及圆 $[x-(x_1-r)]^2+[y-(y_1-r)]^2=r^2$, x_1 和 y_2 已知。设与两条直线联立解出交点坐标为 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$,与圆联立解出两个交点坐标 $P_3(x_3, y_3)$ 、 $P_4(x_4, y_4)$, M 点与这 4 个交点的距离设为 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 。先比较 d_1 和 d_2 的大小,若 $d_1 < d_2$,则继续比较 r 与 $y_2 - y_1$ 的大小,若 $y_2 - y_1 \leq r$,说明此时测量点位于圆弧上,否则测量点就是 D_1 ;若 $d_1 > d_2$,则继续比较 r 与 $x_1 - x_2$ 的大小,若 $x_1 - x_2 \leq r$,说明此时测量点位于圆弧上,否则测量点就是 D_2 。当测量点位于圆弧区段时,比较 d_3 和 d_4 的大小,较大的对应的为此时的测量点。当滑轨运动到其他区段时测量点的选取过程同理。

4.2 测量数据拟合

模拟出测量数据后,绘制输出数据曲线波形图如图 8 所示。对 4 个极小值及周围采样点进行最小二乘法拟合,即设: $f(x)=a_2x^2+a_1x+a_0$ 。

然后选定极小值点及其前后测量点共 m 个数据点 $\{(x_i, y_i), i=0, 1, 2, \dots, m\}$,带入偏差平方和公式: $\sum_{i=0}^m [a_2x_i^2 + a_1x_i + a_0 - y_i]^2$,求使其达到最小时的系数 $a_j(j=0, 1, 2)$,问题转化为多元函数求极值,对 $a_j(j=0, 1, 2)$ 求偏导得到的方程组写为矩阵形式如下:

$$\begin{bmatrix} m+1 & \sum_{i=0}^m x_i & \sum_{i=0}^m x_i^2 \\ \sum_{i=0}^m x_i & \sum_{i=0}^m x_i^2 & \sum_{i=0}^m x_i^3 \\ \sum_{i=0}^m x_i^2 & \sum_{i=0}^m x_i^3 & \sum_{i=0}^m x_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^m y_i \\ \sum_{i=0}^m x_i y_i \\ \sum_{i=0}^m x_i^2 y_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

对上述矩阵变换求解得到系数矩阵 $A^{[14-15]}$,就得到了拟合曲线。

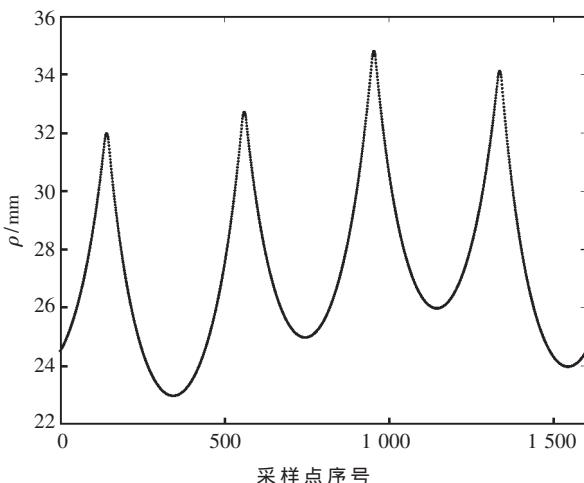
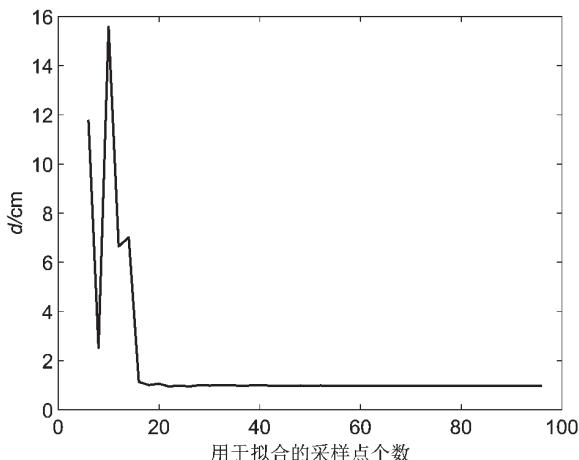


图 8 输出数据波形图

4.2.1 采样点数目的选取

改变 m 的大小得到不同的拟合函数计算出系统参数 d , 通过比较计算值与设定值的差值选择合适的 m 。将用于拟合的采样点数从 5 到 100 递增, 得到系统参数 d , 绘制 d 关于采样点个数的关系折线图, 如图 9 所示。若用于曲线拟合的采样点数过少, 则会导致计算出的系统参数与理想值差距很大, 故继续提高采样点数的起始设定值, 如图 10 所示, 当采样点数选取在 40~60 范围内, d 的计算值稳定接近设定值 1.00 cm 且符合系统精度要求。

图 9 d 关于采样点数的折线图 1

改变正方形标定板与坐标系的位置关系后, 经实验证明上述范围仍然适用。

4.2.2 拟合结果

将 m 取为 40, 拟合结果如表 1 所示, 显然无论取标定板的哪组极小值数据去拟合, 拟合后的数据均比拟合前的数据更接近设定值, 且符合系统精度要求。

4.3 坐标标定结果

直接利用模拟得到的 1600 个测量数据绘制轮廓坐标点如图 11(a)所示。利用标定过的系统参数对正方形

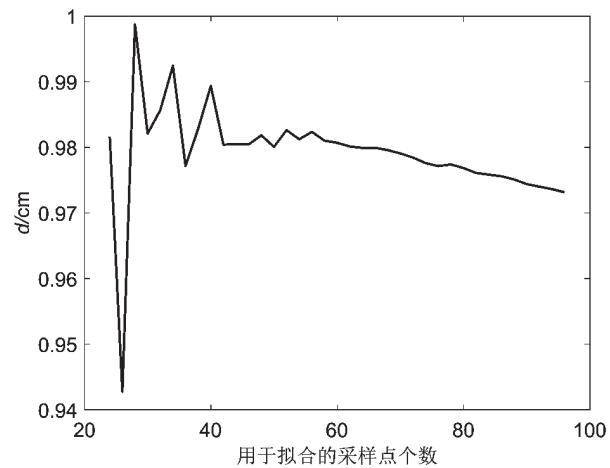
图 10 d 关于采样点数的折线图 2

表 1 拟合前后系统参数对比

系统参数	设定值	拟合前		拟合后	
		上下边	左右边	上下边	左右边
d/cm	1.00	1.302 6	0.046 96	0.982 82	0.971 08
$\Delta L/cm$	2.00	2.016 6	1.977 26	1.999 13	1.998 64
$\alpha_0/(^\circ)$	10.00	9.268 9	12.477 7	10.040 5	10.069 5

标定板的轮廓坐标进行标定后的结果如图 11(b)所示, 显然标定后的轮廓与真实轮廓接近。

5 结论

为解决轮廓扫描仪检测钩零点与旋转平台的旋转中心不重合造成的测量长度及角度误差, 本文提出一种利用正方形的特点, 通过测量正方形标定板得到的测量数据并经给最小二乘法拟合后计算出轮廓扫描仪的系统参数, 进而对测量数据进行处理实现了坐标标定, 还原出被测物体的真实轮廓。并通过 Qt Creator 软件编程模拟仿真了测量过程, 用仿真出的数据验证了算法的可行性。该方法大大降低了测量仪的制造和安装要求, 通过在线标定即可快速测量被测物体轮廓且满足系统的精度要求, 标定精度高而可靠。

参考文献

- [1] 管栋. 基于结构光的眼镜镜框轮廓测量系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [2] 陈华祯, 张昂, 马晓倩. 基于非接触式方法的三维重建技术综述[J]. 电子世界, 2020(3): 72~73.
- [3] Bu Xuhui, Hou Zhongsheng. Adaptive iterative learning control for Linear systems with binary-valued observations[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018, 29(1): 232~237.
- [4] 丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 27~41.
- [5] 孙艳玲, 常素萍. 接触式表面轮廓测量的非线性误差分析与补偿[J]. 计量学报, 2016, 37(6): 563~566.
- [6] 冯超鹏, 祝连庆, 潘志康, 等. 一种新的圆光栅偏心参数

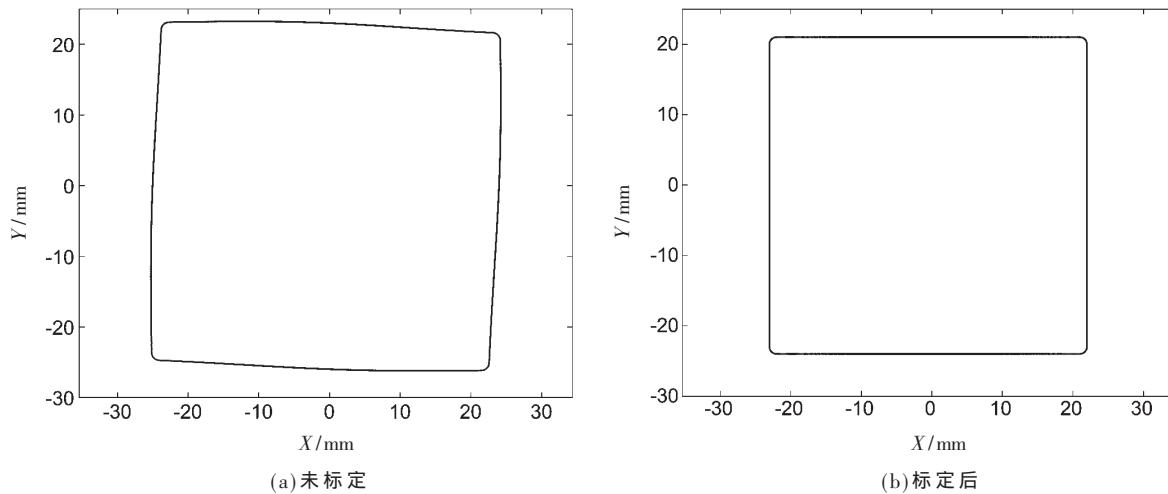


图 11 轮廓坐标图

自标定方法[J].仪器仪表学报,2016,37(11):2459-2464.

- [7] 朱嘉齐,章家岩,冯旭刚.柔性臂测量机的圆光栅偏心参数标定算法[J].电子测量与仪器学报,2019,33(8):1-7.

(上接第 64 页)

Hellman , RSA , DSS , and other systems[C].Proceedings of the 16th Annual International Cryptology Conference on Advances in Cryptology , 1996.

[2] KOCHER P C , JAFFE J M , JUN B C .Differential power analysis[M].Springer–Verlag , 2009.

[3] CHARI S , RAO J R , ROHATGI P .Template attacks[C].Cryptographic Hardware and Embedded Systems–CHES 2002 , 4th International Workshop , Redwood Shores , CA , USA , August 13–15 , 2002 , Revised Papers. Springer , Berlin , Heidelberg , 2002.

[4] BRIER E , CLAVIER C , OLIVIER F .Correlation power analysis with a leakage model[C].Cryptographic Hardware and Embedded Systems–CHES 2004 : 6th International Workshop Cambridge , MA , USA , August 11–13 , 2004.

[5] AIGNER M , OSWALD E .Power analysis tutorial[D].Graz , Austria : University of Technology Graz , 2000.

[6] GEBOTYS C H .EM analysis of Rijndael and ECC on a wireless Java–based PDA[C]. Proceedings of CHES 2005 , 2005 , 3659 : 250–264.

[7] 乌力吉,张振宾,董刚,等.基于侧信道相关能量分析的频域分析方法:中国,CN104052590A[P].2014-09-17.

[8] 王敏,饶金涛,吴震,等.SM4 密码算法的频域能量分析攻击[J].信息网络安全,2015(8):20-25.

[9] 向春玲,吴震,饶金涛,等.针对一种 AES 掩码算法的频域相关性能量分析攻击[J].计算机工程,2016,42(10):146–150.

[10] LERMAN L , MEDEIROS S F , VESHCHIKOV N , et al . Semi–supervised template attack[C].Proceedings of the 4th International Conference on Constructive Side–Channel

[8] 于源, 卢军, 王小椿. 自由曲面测量中曲面匹配的建模及算法分析[J]. 机械科学与技术, 2001, 20(3): 467-468, 471.

(下转第 74 页)

Analysis and Secure Design. Springer-Verlag, 2013.

- [11] 刘飚.基于机器学习的密码芯片电磁攻击技术研究[D].北京:北京邮电大学,2014.
 - [12] 唐明,王欣,李延斌,等.针对轻量化掩码方案的功耗分析方法[J].密码学报,2014,1(1):51–63.
 - [13] 唐明,王欣,胡晓波,等.基于聚类分析的轻量化掩码分析方法[J].武汉大学学报,2016,62(3):230–234.
 - [14] ZHANG R N, ZHANG Q M, CHEN J H. A power attack method based on clustering[C]. 2017 International Conference on Computer, Electronics and Communication Engineering(CECE 2017), 2017: 418–424.
 - [15] ROUSSEEUW P J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 1987, 20: 53–65.
 - [16] 张素洁,赵怀慈.最优聚类个数和初始聚类中心点选取算法研究[J].计算机应用研究,2017,34(6):1617–1620.
 - [17] NewAE Technology Inc. ChipWhisperer main page[EB/OL].[2020-04-14].https://wiki.newae.com/Main_Page.
 - [18] NewAE Technology Inc. CW1173 ChipWhisperer-Lite[EB/OL].[2020-04-14].https://wiki.newae.com/CW1173_Chip-Whisperer-Lite.

(收稿日期:2020-04-14)

作者简介：

蔡爵嵩(1992-),男,硕士,主要研究方向:安全专用芯片设计、机器学习。

严迎建(1973-),男,博士,教授,主要研究方向:芯片安全防护。

朱春生(1988-),男,博士,讲师,主要研究方向:芯片安全防护。

通过对表 1 中的数据对比可知,在同等噪声密度情况下,本文算法其 MSE 值最小、PSNR 值最大,自适应中值滤波算法次之,标准中值滤波算法、OCF 算法及 COF 算法性能基本相近。总体而言,本文算法具有均方误差小以及峰值信噪比高的优点,其滤波性能相比标准中值滤波算法、自适应中值滤波算法、OCF 算法、COF 算法等有一定程度的提高。

5 结论

本文经实验证明,对受椒盐噪声污染的图像,以可疑噪声点为中心,构建一个 7×7 大小的邻域,对可疑椒盐噪声点邻域进行形态学闭滤波,对可疑盐噪声点邻域进行形态学开滤波,并以滤波后的该邻域中心点的灰度值替换可疑噪声点的灰度值,而非可疑噪声点的灰度值保持不变的方案切实可行。但对于更高噪声密度的情况,如何能更好地滤除噪声,同时具备较强的细节保护能力是以后的重点研究方向。

参考文献

- 通过对表 1 中的数据对比可知,在同等噪声密度情况下,本文算法其 MSE 值最小、PSNR 值最大,自适应中值滤波算法次之,标准中值滤波算法、OCF 算法及 COF 算法性能基本相近。总体而言,本文算法具有均方误差小以及峰值信噪比高的优点,其滤波性能相比标准中值滤波算法、自适应中值滤波算法、OCF 算法、COF 算法等有一定程度的提高。

5 结论

本文经实验证明,对受椒盐噪声污染的图像,以可疑噪声点为中心,构建一个 7×7 大小的邻域,对可疑椒盐噪声点邻域进行形态学闭滤波,对可疑盐噪声点邻域进行形态学开滤波,并以滤波后的该邻域中心点的灰度值替换可疑噪声点的灰度值,而非可疑噪声点的灰度值保持不变的方案切实可行。但对于更高噪声密度的情况,如何能更好地滤除噪声,同时具备较强的细节保护能力是以后的重点研究方向。

参考文献

 - [1] 沈德海,侯建,鄂旭,等.一种窗口自适应的去椒盐噪声滤波算法[J].现代电子技术,2015,38(7):89–91.
 - [2] IRUM I, SHARIF M, RAZA M, et al. A nonlinear hybrid filter for salt & pepper noise removal from color images[J]. Journal of Applied Research and Technology, 2015, 13: 79–85.
 - [3] DE NATALE F G B, BOATO G. Detecting morphological filtering of binary images[J]. Transactions on Information Forensics and Security, 2017, 12(5): 1207–1217.
 - [4] 董怡,金伟其,张淼.数学形态学滤波在红外图像去噪中的应用研究[J].激光与红外,2007,37(8):795–798.
 - [5] ZHANG W G, SHI D, YANG X Q. An improved edge detection algorithm based on mathematical morphology and directional wavelet transform[C]. 8-th International Congress on Image and Signal Processing, 2015: 335–339.
 - [6] 石跃祥,康蕴,刘海涛.基于数学形态学的彩色噪声图像边缘检测算法[J].计算机应用研究,2012,29(3):1172–1174.
 - (上接第 70 页)
 - [9] 仇谷烽,余景池,黄启泰,等.接触式三坐标测量自由曲面轮廓的数据处理模型[J].光学精密工程,2013,21(11):2813–2820.
 - [10] FILELIS-PAPADOPOULOS C K, GRAVANIS G A. Hybrid multilevel solution of sparse least-squares linear systems[J]. Engineering Computations, 2017, 34(8): 2752–2766.
 - [11] 李青,刘红光,李凌梅,等.三坐标测量机校准综合示值误差分析[J].国外电子测量技术,2018,37(6):35–38.
 - [12] 李静,高华钰,沈南燕,等.复杂轴类零件非圆轮廓接触式随动测量方法[J].机械工程学报,2018,54(5):38–46.
 - [13] Deng Chongyang, Lin Hongwei. Progressive and iterative
 - [7] 李杰,苗长云,武志刚,等.基于数学形态学的图像边缘检测算法的研究[J].计算机科学,2012,39(6A):546–547.
 - [8] 卫星,焦蓬蓬,史永.基于柔性形态学滤波优化的周期性噪声消除算法[J].现代电子技术,2016,39(21):70–74.
 - [9] DENG G H, LIU Z L. Study of edge detection based on SQI algorithm and morphology[C]. 11th International Conference on Computational Intelligence and Security, 2015: 203–205.
 - [10] SAPUTRA I D, SMITH J S, WU Q H. Combination of morphology edge detection and skeletonization in detecting time location of power disturbances[C]. 5th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, 2014: 1–5.
 - [11] 吴晓元,常海涛,苟军年. Faster R-CNN 定位后的工业 CT 图像缺陷分割算法研究[J].电子技术应用,2019,45(1):76–79.
 - [12] 田子林,陈家新.基于最小二乘法与霍夫变换的虹膜定位算法[J].电子技术应用,2019,45(2):75–78.
 - [13] 万丰丰,周国民,周晓.一种去除椒盐噪声的自适应模糊中值滤波算法[J].浙江大学学报(理学版),2019,46(4):445–453.
 - [14] 郭海涛,徐雷,赵红叶,等.一种抑制声呐图像散斑噪声的形态学滤波器[J].仪器仪表学报,2015,36(3):654–658.
 - [15] 黄琪,李鼎权,施涛,等.一种针对椒盐噪声的新型迭代自适应滤波器[J].南开大学(自然科学版),2015,48(5):84–89.

(收稿日期:2020-04-12)

作者简介：

文福林(1979-),男,硕士,讲师,主要研究方向:数字图像处理、模式识别、数字信号处理。

张凯(1984-),通信作者,男,博士,助理研究员,主要研究方向:创新设计与智能设计,E-mail:zkscu2005@163.com。

蒲锋(1980-),男,硕士,讲师,主要研究方向:自动检测、模式识别。

approximation for least squares B-spline curve and surface fitting[J]. Computer-Aided Design, 2014, 47:32-44.

- [14] 陈良泽.用矩阵运算实现曲线拟合中的最小二乘法[J].
传感器技术,2001(2):30-31,34.
 - [15] 陈韦名.曲线拟合原理及其应用研究[D].长沙:长沙理工大学,2018.

(收稿日期:2020-07-06)

作者简介：

高彤(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:光电检测技术、图像处理。

陈鸿(1963-),通信作者,男,博士,教授,主要研究方向:电路设计、自动化测试与控制技术、光电检测技术等,
E-mail: chenhong@nuc.edu.cn。

张亮(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:智慧交通。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所