

文章编号 1004-924X(2008)11-2281-05

离散点的线轮廓度评价算法

张进,王仲,李超,贡力,叶声华

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

摘要:为了实现微型零件轮廓的高精度测量,根据其成像特点,提出了一种基于离散点的轮廓度评价算法——被测轮廓与理论轮廓离散点间最小距离法。首先,提取出被测轮廓的边缘点信息,然后,依据理论轮廓计算出一系列间距极小的坐标点并建立坐标系,将被测轮廓点与理论轮廓点对应,最后将计算得出的每个被测轮廓点到最近理论轮廓点的距离作为该点的轮廓度误差。实验结果证明,测量精度优于2 pixel,此方法可有效地提高线轮廓度的评价精度和效率。

关键词:线轮廓度误差;微型零件;最小距离法;离散点

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Evaluation algorithm of curve profile based on discrete points

ZHANG Jin, WANG Zhong, LI Chao, GONG Li, YE Sheng-hua

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: For achieving high precision measurement of linear profile for micro-parts, an evaluation algorithm of linear profile based on discrete points is proposed according to the imaging characteristics. Firstly, an edge detector is used to obtain the edge of the micro-parts. Then, a series of points with tiny interval can be calculated by the expressions of designed profile and a system coordinate is build for corresponding the points of actual profile and the points of designed profile. Finally, the minimum distance between every point of actual profile and the point of designed profile is taken as the linear profile error of the point. The experimental results show that the error is less than 2 pixel, so the proposed algorithm can significantly improve the precision and efficiency in the measurement of linear profile.

Key words: linear profile error; micro-part; minimum distance method; discrete point

1 引言

在实际生产过程中,线轮廓度,尤其是复杂的微型零件轮廓度的评定,一直是应用广泛而又难

以测定的项目^[1]。目前,一些大量使用微型零件的企业采用投影仪,通过模板比对测量零件的轮廓度,由于存在实物模板误差和人工判别误差,难以实现高精度、高效率的测量。而新兴的影像测量仪大都针对微型零件中的圆孔、直线等单个的

几何要素,对复杂线轮廓度的测量较为困难。

目前,在做复杂的线轮廓度评价时,常采用牛顿迭代法等优化算法计算被测点到理论轮廓线的最近距离^[2],计算过程复杂,有些情况甚至无法求解。另外当整个轮廓曲线由多个表达式构成时,还需要先判断被测点所对应的轮廓表达式;对于仅给出一系列型值点的轮廓常采用三次样条等函数来拟合理论轮廓,得到拟合的理论轮廓表达式后再依据前面的方法,计算出被测点的轮廓度误差^[3],其中拟合过程必然会有精度损失。

针对目前线轮廓度评价方法的繁琐和局限性,本文提出了一种基于离散点的轮廓度评价算法,该算法主要计算点到点的最小距离,避免了较为困难的点到不规则曲线最小距离的计算。

2 线轮廓度的评价原则

线轮廓度误差是指实际被测轮廓线对理论轮廓线的变动量^[4]。按轮廓度误差的定义,最基本的评定原则需要满足最小包容区域原则。最小包容区域是指由两条平行曲线包容实际轮廓线时,具有最小宽度的包容区域^[5]。在线轮廓度误差的评定中,任何方法都要以该原则为基本原则,但由于直接采用该原则较为困难,常采用最小二乘等近似算法^[6]。线轮廓度的评价依据有无基准可分为有基准要求的线轮廓度和无基准要求的线轮廓度,本文以有基准要求的线轮廓度为例,论述基于离散点的轮廓度算法,对于无基准要求的线轮廓度同样适用。

3 基于离散点的评价算法

3.1 理论轮廓离散点的计算

微型零件的理论轮廓线通常是由隐方程、参数方程等表示。在选择特定的特征点建立直角坐标系 xoy 后,依据方程或图纸,以极小的间隔来计算出一系列位于理论轮廓线上的型值点 $p_i(x_i, y_i)$, $i=1, 2, \dots, n$, n 为型值点个数, p_i 即是在坐标系 xoy 下的理论轮廓离散点。

3.2 被测轮廓离散点的获取

本测量系统如图 1 所示。在得到微型零件的完整图像之后,通过边缘检测算法提取出被测轮廓的边缘信息。该边缘信息由一系列在图像坐标

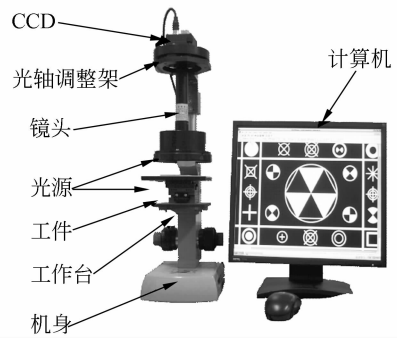


图 1 测量系统实物图

Fig. 1 Picture of measuring system

系下的坐标点 $q_j(x_j', y_j')$ 构成, $j=1, 2, \dots, m$, m 为边缘点个数。然后与理论轮廓线对应选取相同的特征点来建立新的直角坐标系 $x'o'y'$ 。设该坐标系的原点 o' 在图像坐标系下的坐标为 (a, b) , 且该坐标系与图像坐标系沿顺时针方向的偏转角为 θ 。由式(1)可以将 $q_j(x_j', y_j')$ 转变为在坐标系 $x'o'y'$ 下的点列 $Q_j(x_j'', y_j'')$, $j=1, 2, \dots, m$, Q_j 即是在坐标系下的被测轮廓离散点。

$$\begin{cases} x'' = (x' - a) \cos \theta - (y' - b) \sin \theta \\ y'' = (x' - a) \sin \theta + (y' - b) \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

3.3 离散点间的最小距离

利用离散点进行线轮廓度的评定,即将理论轮廓的离散点 $p_i(x_i, y_i)$ 与被测轮廓的离散点 $Q_j(x_j'', y_j'')$ 进行对比计算。首先,对于每一个 Q_j 均在 p_i 中搜索一个与其距离最近的点。其次,计算出每个 Q_j 对应的最小距离 d_j 。最后,计算出数列 d_j 中的最大值 d_{\max} , 该 d_{\max} 即是被测轮廓的线轮廓度误差。离散点间最小距离的示意图如图 2

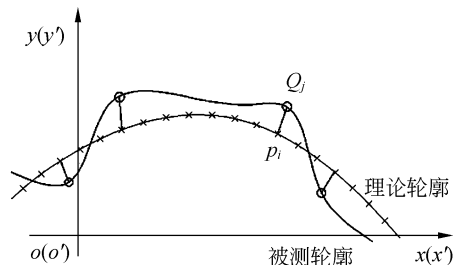


图 2 最小距离法示意图

Fig. 2 Method of minimum distance

所示,由于选取相应的特征点来建立坐标系,因此在理论上坐标系 xoy 与 $x'o'y'$ 重合。图中十字代表离散的理论轮廓点 p_i , 小圆代表被测轮廓的离

散点 Q_j , 设理论轮廓线的长度为 L , p_i 之间的间隔均为 δ , 则:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \delta = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{L}{n} = 0 \quad (n \text{ 为 } p_i \text{ 的个数}) \quad (2)$$

由式(2)知, 当理论轮廓的离散点个数 n 趋于无限时, 点之间的间隔趋近于零。此时, 对于每一个 Q_j 所对应的最小距离 d_j 均是沿理论轮廓线的法线方向上的偏差, 即该点的线轮廓度误差。

4 精度分析

该算法中, 理论轮廓离散点是依据理论轮廓的表达式或设计曲线通过数学计算得出, 被测轮廓离散点是测量系统的测量与处理的结果。因此, 在理想情况下, 仅有测量系统所带来的测量偏差而该方法不存在原理误差。但在实际测量中由于无法达到理想状态, 不可避免地会带来一定的原理误差。

4.1 设计基准和测量基准的不重合

在该方法中按照坐标系 xoy 与 $x'o'y'$ 相重合来将理论轮廓的离散点与被测轮廓的离散点对应起来。在实际建立坐标系的过程中, 尽管选取相应的特征点来建立坐标系, 但由于测量误差的存在, 依据设计基准建立的坐标系 xoy 与依据测量基准建立的坐标系 $x'o'y'$ 必定会存在一定的偏差。

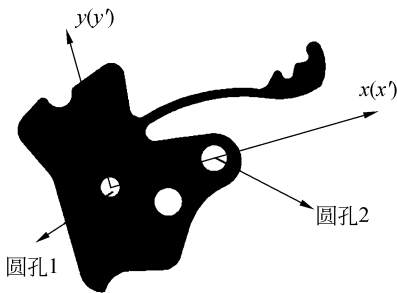


图 3 微型零件理论轮廓

Fig. 3 Designed profile of micro-part

对如图 3 所示有基准要求的零件轮廓, 选择设计基准点——圆孔 1 的圆心 o_1 作为原点, 以另一设计基准点——圆孔 2 的圆心 o_2 作为 x 轴上一点来建立坐标系 xoy 与 $x'o'y'$, 其中 xoy 按照理论坐标建立, 而 $x'o'y'$ 则需要依靠测得的数据通过坐标系的变换来建立。测得的圆孔 1 的圆心

o_1' 与圆孔 2 的圆心 o_2' 必定会与真实值存在误差。因此, 对于有基准要求的线轮廓度误差的测量, 选取基准点来建立坐标系时要尽量实现基准点的高精度测量。

对于无基准要求的线轮廓度的测量, 首先仍选取相应的特征点进行粗定位; 然后采用满足最小二乘的自适应调整算法^[2], 从 p_i 中找出与 Q_j 对应的 j 个坐标点, 并构成数组 $p_j(x_j, y_j)$, 数学模型如式(3), 找出被测轮廓坐标系最优的平移量 $\Delta x, \Delta y$ 和偏转角度 $\Delta \phi$ 对坐标系进行微调; 最后通过坐标变换把被测轮廓离散点的坐标变换到调整后的坐标系下并与理论轮廓离散点进行比对。

$$\min F(\Delta x, \Delta y, \Delta \phi) = \sum_{j=0}^m \{ \min \sqrt{(x_j'' - x_j)^2 + (y_j'' - y_j)^2} \}^2 \quad (3)$$

4.2 理论轮廓线的有限细分

由于在计算理论轮廓离散点的过程中不可能实现对轮廓曲线的无限细分, 因此相邻的两个离散点的间距 δ 不可能为零。如图 4 所示, 实际计

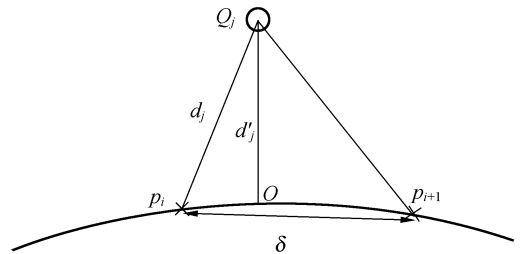


图 4 有限细分误差示意图

Fig. 4 Error by limited fractionization

算出的最小距离 $p_i Q_j$ 是偏离理论轮廓线的法线方向 OQ_j 的。由 p_i, O, Q_j 构成的三角形可知:

$$d_j - d_j' < O p_i < \delta / 2 \quad (4)$$

由式(4)可知, 实际最小距离由于偏离理论轮廓线的法线方向而产生的原理误差 $< \delta / 2$ 。在实际计算的过程中可以依据被测件的精度要求决定间距 δ 的大小, 能够满足测量精度即可, 如果 δ 选取过小, 数据量将成几何量级增加。

在一些测量精度要求极高的场合, 当 δ 的选取相当小的时候, p_i 与 p_{i+1} 之间的曲线段可近似的看成直线, 因此可以求出 Q_j 到 $p_i p_{i+1}$ 的垂线距离来近似的代替 Q_j 到曲线段 $p_i p_{i+1}$ 法线方向的距离, 以便有效地降低原理误差并减少数据量。

4.3 被测轮廓点的测量误差

被测轮廓点是利用图像处理技术从被测零件的图像中获得的,然后通过标定技术将像素单位转换为标准长度单位,因此得到的被测轮廓点不可避免地存在着误差,该测量误差将直接影响到被测零件的线轮廓度的评价。合理地采用亚像素算法对轮廓边缘的像素级边缘点进行高精度的定位,可以有效地提高被测轮廓点的定位精度。

5 实验

实验采用 BaslerA102f 数字相机, Zeiss 物方远心镜头和面阵 LED 背光照明系统对高精度光刻模板进行测量,模板的刻制精度可以达到 $0.2 \mu\text{m}$,且模板上零件的边缘非常清晰,因此将模板上的光刻零件作为理想标准零件来进行测量,测量系统如图 1 所示。



图 5 被测零件图像

Fig. 5 Image of a micro-part

首先对如图 3 所示的微型零件进行成像,获得的图像如图 5 所示,该零件的轮廓度误差测量要求不超过 0.06 mm 。然后按 3.1 所述建立坐标系 xoy ,并以 $5 \mu\text{m}$ 增量来离散理论轮廓线,得到理论轮廓线的离散点。对于通过 CCD 获得的被测零件图像,首先精确地测得圆孔 1 和圆孔 2 的圆心坐标,然后建立相应的坐标系 $x'o'y'$,将测得的边缘点坐标通过转换得到在 $x'o'y'$ 坐标系下的新坐标,并通过标定将像素当量转变为毫米单位,最后与理论轮廓离散点中的数据进行比对计算。图 6 所示为测量数据表单中的部分数据,左列为实际轮廓点坐标,中间为与其距离最小的理论轮廓点坐标,右列为两点之间的距离。表 1 列出部分采样点的测量结果,单位 μm 。图 7 绘制出整个零件外轮廓点的轮廓度误差示意图,其中两

条线分别表示偏差为 $\pm 0.020 \text{ mm}$ 的位置。

(0.778 2, 4.845 1)	(0.775 1, 4.855 2)	MmDis= -0.010 486
(0.792 1, 4.856 9)	(0.789 7, 4.858 8)	MmDis= -0.003 038
(0.805 0, 4.855 8)	(0.804 3, 4.862 4)	MmDis= -0.006 585
(0.817 8, 4.854 7)	(0.814 0, 4.864 8)	MmDis= -0.010 751
(0.831 8, 4.866 5)	(0.833 4, 4.869 6)	MmDis= -0.003 442
(0.844 7, 4.865 4)	(0.843 1, 4.872 9)	MmDis= -0.006 718
(0.857 5, 4.864 3)	(0.852 8, 4.874 4)	MmDis= -0.011 076
(0.871 5, 4.876 1)	(0.872 2, 4.879 2)	MmDis= -0.003 125
(0.884 4, 4.875 0)	(0.881 9, 4.881 6)	MmDis= -0.006 955
(0.897 2, 4.873 9)	(0.896 5, 4.885 2)	MmDis= -0.011 229
(0.911 2, 4.885 7)	(0.911 1, 4.888 7)	MmDis= -0.003 026
(0.924 0, 4.884 6)	(0.920 8, 4.891 1)	MmDis= -0.007 286
(0.936 8, 4.883 6)	(0.935 3, 4.894 7)	MmDis= -0.011 394
(0.950 9, 4.893 3)	(0.949 9, 4.898 3)	MmDis= -1.003 163
(0.963 7, 4.894 2)	(0.959 6, 4.900 7)	MmDis= -0.007 698
(0.976 6, 4.893 2)	(0.974 2, 4.904 3)	MmDis= -0.011 443
(0.990 5, 4.904 9)	(0.988 7, 4.907 9)	MmDis= -0.003 511
(1.003 4, 4.903 9)	(1.003 3, 4.911 5)	MmDis= -0.007 684
(1.016 3, 4.902 8)	(1.013 0, 4.913 9)	MmDis= -0.011 643
(1.030 2, 4.915 4)	(1.027 6, 4.917 5)	MmDis= -0.004 014
(1.043 1, 4.913 5)	(1.042 1, 4.921 1)	MmDis= -0.007 733
(1.056 0, 4.912 4)	(1.051 8, 4.923 5)	MmDis= -0.011 901
(1.069 9, 4.924 2)	(1.071 2, 4.928 3)	MmDis= -0.004 374
(1.082 8, 4.923 1)	(1.080 9, 4.930 7)	MmDis= -0.007 876
(1.095 7, 4.922 0)	(1.090 7, 4.933 1)	MmDis= -0.012 214
(1.109 6, 4.933 8)	(1.110 1, 4.937 9)	MmDis= -0.004 185
(1.122 5, 4.932 7)	(1.119 8, 4.940 3)	MmDis= -0.008 107
(1.135 3, 4.931 6)	(1.134 3, 4.943 9)	MmDis= -0.012 370
(1.149 3, 4.943 4)	(1.148 9, 4.947 5)	MmDis= -0.004 165
(1.162 2, 4.942 3)	(1.158 6, 4.949 9)	MmDis= -0.008 419
(1.176 1, 4.954 1)	(1.178 0, 4.954 7)	MmDis= -0.002 014
(1.189 0, 4.953 0)	(1.187 7, 4.957 1)	MmDis= -0.004 319
(1.201 9, 4.951 9)	(1.197 4, 4.959 5)	MmDis= -0.008 804
(1.215 8, 4.963 7)	(1.216 9, 4.964 3)	MmDis= -0.001 228
(1.228 7, 4.962 6)	(1.226 6, 4.966 7)	MmDis= -0.004 629
(1.241 5, 4.961 5)	(1.241 1, 4.970 3)	MmDis= -0.008 815
(1.255 4, 4.973 3)	(1.255 7, 4.972 9)	MmDis= -0.000 653
(1.268 4, 4.972 2)	(1.265 4, 4.976 3)	MmDis= -0.005 066
(1.281 2, 4.971 1)	(1.280 0, 4.979 9)	MmDis= -0.008 884
(1.295 2, 4.982 9)	(1.294 5, 4.983 5)	MmDis= -0.000 300
(1.308 1, 4.981 8)	(1.309 1, 4.987 1)	MmDis= -0.005 395

图 6 数据表单中的部分数据

Fig. 6 A parts of data from data table

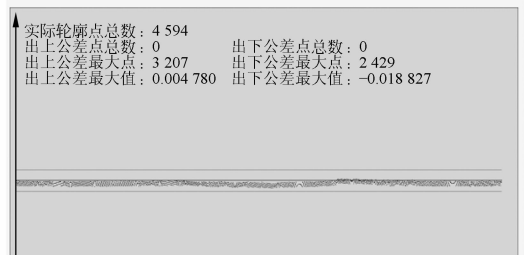


图 7 线轮廓度误差示意图

Fig. 7 Image of linear profile error

表 1 实验数据(单位: μm)

Tab. 1 Measurement results(unit: μm)

采样点序列	轮廓度误差	采样点序列	轮廓度误差
1	-12.5	11	-2.9
2	-9.3	12	-4.6
3	-6.8	13	1.8
4	-12	14	2
5	-6.7	15	-4.4
6	-9.9	16	-12
7	4.3	17	-9.3
8	0.7	18	-10.1
9	0.7	19	-17.1
10	-0.1	20	-14.6

从测量数据可以得到,采样点的线轮廓度最大正偏差为 $4.8 \mu\text{m}$,最大负偏差为 $18.8 \mu\text{m}$,总采样点数为 4 594 个。另外,标定后系统的像素

当量为 $12.9037\ \mu\text{m}$,因此,采用基于图像的最小距离法测量线轮廓度的精度优于 2 pixel,完全能够满足该微型零件线轮廓度 $0.06\ \text{mm}$ 的测量要求。

6 结 论

针对微型零件的成像特点以及其线轮廓度

的测量要求,本文提出了一种基于离散点的线轮廓度评价算法。该方法在得到理论轮廓离散点与被测轮廓离散点的基础上,结合高精度的图像特征提取算法,避免了困难的点到不规则曲线最小距离的计算,有效地简化了微型零件不规则线轮廓度误差的评定,提高了测量的精度和效率,适用于形状复杂的微型零件线轮廓度的高精度测量,实验结果表明,该方法的评定精度可优于 2 pixel。

参考文献:

- [1] 于源,邱子魁.平面曲线轮廓度误差评定的算法分析[J].北京化工大学学报,2006,33(4):41-43.
YU Y, QIU Z K. Algorithmic analysis of error evaluation for a planar free-form curve profile [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, 2006, 33(4): 41-43. (in Chinese)
- [2] 刘文文,聂恒敬.一种自适应的平面线轮廓度误差评定方法[J].计量学报,1999,20(1):27-31.
LIU W W, NIE H J. An auto-spotting evaluation method of plane profile of any line [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1999, 20(1): 27-31. (in Chinese)
- [3] 侯宇,张竞,崔晨阳.复杂线轮廓度误差评定方法[J].仪器仪表学报,2001,22(1):104-106.
HOU Y, ZHANG J, CUI CH Y. A evaluation method of complicated curve profile error [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22(1): 104-106. (in Chinese)
- [4] 熊有伦.精密测量的数学方法[M].北京:中国计量出版社,1989.
XIONG Y L. *Mathematical Method of Precision Measuring* [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1989. (in Chinese)
- [5] 甘永立,宋芸,方亚彬,等.形状和位置误差检测[M].北京:国防工业出版社,1995:225-241.
GAN Y L, SONG Y, FANG Y B, et al.. *Error Detection of Figure and Position* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995: 225-241. (in Chinese)
- [6] 张琳,郭俊杰,姜瑞,等.自由曲线轮廓度误差评定中的坐标系自适应调整[J].仪器仪表学报,2002,23(2):203-205.
ZHANG L, GUO J J, JIANG R, et al.. Self-adapt adjustment of coordinate system in evaluation of freeform curve profile [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002, 23(2): 203-205. (in Chinese)
- [7] 伍济钢,宾鸿赞.机器视觉的薄片零件尺寸检测系统 [J].光学精密工程,2007,15(1):124-130.
WU J G, BIN H Z. Dimensional inspecting system of thin sheet parts based on machine vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 124-130. (in Chinese)

作者简介:张 进(1985—),男,博士研究生,主要从事图像测量算法及相关领域的研究工作。E-mail: zhangjinhi_2005@china.com.cn

叶声华(1934—),男,教授,博士生导师,中国工程院院士,主要从事机器视觉检测及相关领域的研究。

王 仲(1953—),男,教授,长期从事视觉检测、精密机械等领域的研究。E-mail: wangzhong@tju.edu.cn