

异形回转零件的一种图像测量研究

缪秀娥

(华南理工大学机电工程系, 广州 510641)

肖沙里 钟先信 陈愚

(重庆大学光电精密仪器系, 重庆 630044)

摘要 讨论了利用线阵 CCD 图像测量方法。配备 Z、Y 二维运动工作台及绕 Z 轴回转数显工作台, 对异形回转体三维轮廓尺寸进行检测, 用 Marr 边缘检测算子对 CCD 获得的原始灰度图像进行处理, 采取最小二乘法完成曲线拟合, 以获得亚像元分辨率。在对 $\phi 200$ mm 异形回转体零件进行尺寸测量时, 测量系统的分辨率达到微米级的水平。

关键词: 位置测量; 线阵 CCD; 边缘检测

1 引言

随着现代科学技术的发展, 物体表面轮廓的三维测量已成为现代测量技术的一个重要分支。在物体三维轮廓测量方法中, 常用的有三坐标测量法、干涉测量法、莫尔等高线法、相位测量法等。而非接触式的 CCD 图像测量较其它方法有其自身优势, 譬如测量效率高, 可对那些薄壁、软质易变形的以及有化学污染一类的零件进行非接触在线快速测量等。电荷耦合器件 CCD 由于具有自扫描、光电灵敏度高、几何尺寸精确、敏感单元尺寸小等一系列优点, 因而被广泛地用于工业非接触测量领域中。在精密定位、尺寸测量等方面, 光敏面上均表现为空间光强分布的形式, 经过数据采集和处理获得被测图像有关信息。随着计算机技术的普及, 采用 CCD 器件和计算机数据采集、光学成像、机械运动组成的图像测量系统, 能实时地对被测图像进行快速采样、存储和数据处理, 实现光机电算一体化检测。本文介绍采用 5000 像元线阵摄像机及其图像卡, 与计算机联机, 对异形回转体轮廓的三维尺寸进行非接触测量, 取得了满意的效果。

2 测量原理及方法

CCD 图像测量原理如图1所示。

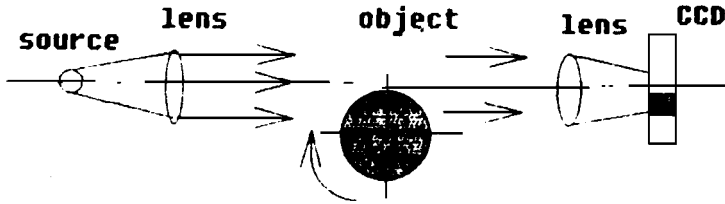


Fig. 1 The principle of measurement

当入射光在 CCD 像元上成像时,入射光被 CCD 像元吸收并产生相应数量的光生电荷。在光积分期间,光生电荷被积累并存储在彼此隔离的像元的势阱中,每个像元势阱中所积累的信号电荷数与照射在该像元面上的平均照度和光积分时间的乘积成正比。在电荷转移期间,光生电荷依次转移至输出区,通过复位脉冲的控制,在输出级形成视频信号。每次积分的输出波形代表目标光图像在 CCD 采样方向的瞬态强度的空间分布。由 CCD 输出的模拟信号是一个个脉冲信号,这些随时间变化的脉冲信号与随空间分布的光敏像元光强对应,通过物距、像距关系及 CCD 输出脉冲量的计算来检测零件尺寸。

本文针对异形回转体零件轮廓尺寸的检测进行研究,例如工件尺寸为 $R = 100 \text{ mm}$ 到 $R = 120 \text{ mm}$ 的变化范围的异形回转体零件。考虑零件尺寸较大,如采用全视场的接收工件图像,CCD 采集到的是一个缩小倍率很大的像,这将引入较大误差。图2所示的测量方案利用对工件轮廓边缘进行局部检测,将提高图像测量系统的分辨率和精度,有效地满足了测量精度的要求。

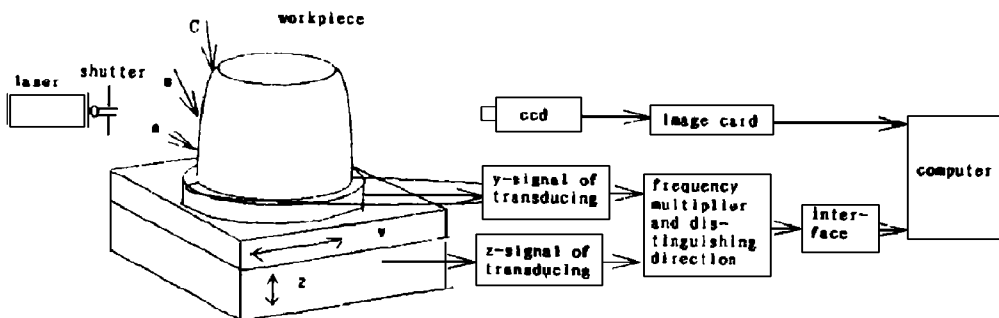


Fig. 2 Schematic measurement program

这套测量系统包括:高精度空气轴系回转工作台、光电轴角编码器、二维机械传动装置、两座标高精度长光栅直线位移传感器、PC 计算机、线阵 CCD (5000线)、图像采集卡、接口卡、He-

Ne 激光器

整个测量系统工作如下: 设置一个沿 Z 、 Y 方向二维运动数显工作台, 其位移分辨率为 $0.5 \mu\text{m}$, 由步进电机驱动, 使其沿水平方向和垂直方向运动; 二维工作台上安装一回转精度为 0.02 角秒的高精度气浮回转台, 可绕 Z 轴转动; 工件安装在回转工作台上; 这样就可使工件沿 Z 、 Y 方向运动及绕 Z 轴转动。He-Ne 激光器及 CCD 分别置于工作台两侧, 使激光光斑成像于 CCD 器件的中央像元区间, 此时的 CCD 输出的光强信号如图 3(a) 所示。当移动工件轮廓边缘 A 点于激光光斑处, 使其边缘轮廓成像在 CCD 上时, 其输出信号将改变为如图 3(b) 所示。

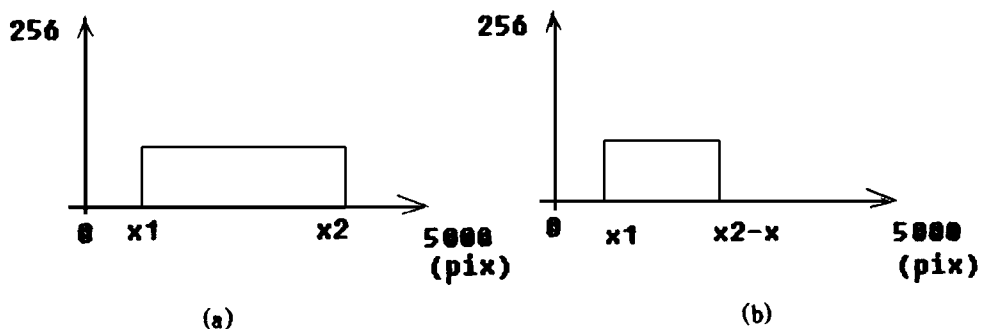


Fig. 3 The output signal

由计算机记录光栅位移传感器当前点 $A(x, y)$ 的位移量以及 CCD 像元输出量, 得到该点的位置; 工件绕 Z 轴旋转, 由光电编码器控制按等间隔采样; 这样工件同一剖面的实际轮廓尺寸误差值将直接反映到 CCD 像元上, 通过 CCD 像元的输出量及物距、像距等关系便可计算出该工件 A 点剖面的二维实际尺寸。当移动工件 B 点于 CCD 视场内, 再由位移传感器记录下 $B(x, y)$ 点的位置量, 旋转工件一周, 计算出 B 点剖面的实际轮廓尺寸。以此类推至 C 点, 便可测量出工件三维轮廓的实际尺寸。实验过程中应用标定 CCD 尺寸当量的方法, 可消除部分系统误差, 达到较高的测量精度。

3 轮廓边缘检测及数据处理

在机器视觉、文字识别、图像测量、生物医学图像分析等实际应用领域中, 图像可视为具有不同灰度级的两类区域。所谓边缘是指周围像素灰度有阶跃变化的那些像素的集合。从灰度级图像出发, 选取一个合适的阈值, 以确定每一图像点应属于目标还是背景。阈值的选取对边缘检测和图像的二值化非常重要。边缘检测的最终目的是根据引起强度变化的物理过程来表示一个图像的强度变化。强度变化是通过强度函数的微分来检测的。一次强度微分的局部最大值和二次强度微分的零交叉点是两个通常使用的特征, 这些微分运算的结果描述了一幅图像强度变化的边缘特性。被测对象经过 CCD 获得的原始测量数据往往带有高频噪声, 微分的作用相当于一个高通滤波器, 因此对原始数据直接进行微分通常是不适用的。在边缘检测的数据处理中, 我们采用 Marr 边缘检测算子对图像数据进行处理。Marr 采用算子 $\nabla^2 G$ 进行边缘检测。

表示 Laplacian 算子 $(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2})$, G 代表二维 Gauss 分布函数。Marr 算子的方法是首先对原始图像作最佳平滑, 滤除高频噪声, 然后再用 Laplacian 算子对平滑的结果用提取零交叉点的方法实现边缘提取; 零交叉点是利用图像的二阶导数特性的边缘检测算法, 对阶跃边缘二阶导数在边缘点出现零交叉, 即边缘点的两旁导函数取异号, 确定零交叉点的位置, 即可实现边缘定位, 如图4所示。

$F(x)$ 表示光强函数, 由卷积性质有:

$$M(x) = \Delta_x [G(x) * F(x)] \quad (1)$$

从 $M(x)$ 可求得零交叉点的位置。对于离散的 CCD 数据 $F(n)$, 并考虑到 $\Delta_x G(x)$ 的偶函数特性, (1) 式的卷积过程可以写作:

$$M(n) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} [\Delta G(i-n)] * F(i) \quad (2)$$

为获得亚像元的定位分辨率, 利用最小二乘拟合方法, 拟合以零交叉点为中心的邻域内的 $M(n)$ 曲线方程, 并由此解出使

$$M(x) = 0 \quad (3)$$

的确定位置。

按(1)式卷积所得 $M(x)$ 可以写作:

$$M(x) = A_2 \left\{ \left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_s^2} \right] + \exp \left[-\frac{(x-x_0-W)^2}{2\sigma_s^2} \right] \right\} \\ = A_2 \left\{ \frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_s^2} \exp \left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_s^2} \right] - \frac{(x-x_0-W)^2}{2\sigma_s^2} \exp \left[-\frac{(x-x_0-W)^2}{2\sigma_s^2} \right] \right\} \quad (4)$$

式中: A_2 —— 信号幅度

W —— 物体宽度

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (5)$$

当物体足够大时, $M(x)$ 可以看作两个单独的高斯分布函数的导数之和, 将(4)式第一项在 x_0 点按泰勒级数展开:

$$M_1(x) = \frac{x-x_0}{\sigma_s^2} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(x-x_0)^{2n-1}}{(-2)^{n-1} n! \sigma_s^{2n}} \quad (6)$$

当 $|x_0 - x| < \frac{\sigma_s}{2}$ 时, $M(x)$ 可以看作直线, 可用一阶多项式近似表示, 方程(3)可写为:

$$\alpha_0 + \alpha_1 x = 0 \quad (7)$$

设: $\{(x_{-i}, M_{-i}), (x_{-i+1}, M_{-i+1}), \dots, (x_0, M_0), \dots, (x_{i-1}, M_{i-1}), (x_i, M_i)\}$ 是初步判断所得的

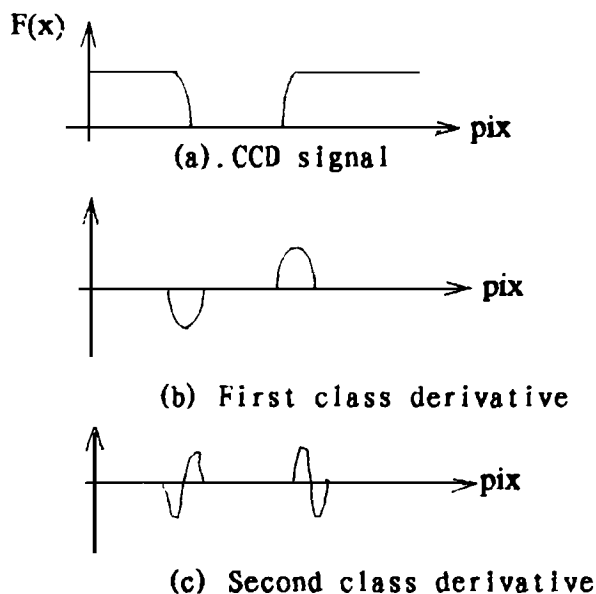


Fig 4 The schemata of detecting zero-cross position

零交叉点为中心的 $2i + 1$ 组点, 由最小二乘法解得系数 α_0, α_i , 代入方程 (7), 解得零交叉点位置:

$$x_0 = \frac{S_L t_0 - S_L t_0}{S_{0L} t_0 - S_L t_0} \quad (8)$$

式中:

$$S_L = \sum_{n=-i}^i x_n^L \quad t_0 = \sum_{n=-i}^i x_n^L M_n \quad (9)$$

直接由离散的 CCD 数据求出的零交叉点只能以像元作为最小分辨率, Marr 方法采用算子滤波图像后, 用最小二乘拟合估计定位算法能获得亚像元的定位精度。

4 实验结果

对本零件尺寸的测量精度, 要求控制其各截面圆度误差, 因此对于这类零件圆度误差的要求及其测量就显得格外重要。利用最小二乘法, 即实际圆轮廓上各点到最小二乘圆圆周距离的平方和为最小, 可确定最小二乘圆的位置, 以最小二乘圆的圆心为理想圆的圆心 (a, b) , 其评定结果不易受个别大误差的影响, 能反映整个被测截面实际轮廓的综合情况, 是一种较合理的方法。

根据最小二乘原理的公式 (10)、(11)、(12) 可计算出理想圆的半径 R 和圆心座标 (a, b) 。

$$a = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n r_i \cos \theta \quad (10)$$

$$b = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n r_i \sin \theta \quad (11)$$

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (12)$$

x_i, y_i ——实际轮廓上各等分点的座标。

r_i ——实际轮廓上各点到极坐标原点的距离。

先计算圆度偏差:

$$F_i = r_i - a \cos \theta - b \sin \theta - R \quad (13)$$

最后算出圆度误差:

$$F = F_{\max} - F_{\min} \quad (14)$$

运用图2所示测量系统, 当工件在 Y 方向上移动 $10 \mu\text{m}$ 位移时, CCD 像元对应输出变化三个像元素的分辨率情况下, 对工件绕 Z 轴每30°间隔采样一次, 完成一周12次的采样; 再从A点至B点到C点的90°方向每15°采样一次; 总计72次采样, 即可得到该零件三维尺寸的测量全部数据。表1是工件某一截面实测数据及其数据处理结果。其圆度误差按最小二乘原理计算, 得到较为合理的结果。

Table 1 The data of measurement and the result of processing

Angle (θ)	r_i	$r_i^* \cos(\theta)$	$r_i^* \sin(\theta)$	δR	F_i
0	52.496	52.496	0	- 0.017	0.013435
30	52.505	45.47066383	26.2525	- 0.026	0.007012
60	52.506	26.253	45.47152985	- 0.027	- 0.00232
90	52.504	3.21626E-15	52.504	- 0.025	- 0.0068
120	52.499	- 26.2495	45.46546767	- 0.02	- 0.00576
150	52.49	- 45.45767344	26.245	- 0.011	- 0.00181
180	52.48	- 52.48	6.42958E- 15	- 0.001	0.004565
210	52.468	- 45.43862089	- 26.234	0.011	0.007988
240	52.458	- 26.229	- 45.4299063	0.021	0.008322
270	52.436	- 9.63628E- 15	- 52.436	0.043	- 0.0112
300	52.441	26.2205	- 45.4152382	0.038	- 0.01224
330	52.465	45.43602281	- 26.2325	0.014	- 0.0019
total	629.748	0.021392305	0.190798693		
$R =$	52.479		$F_{\min} =$	- 0.01224	
$a =$	0.003565		$F_{\max} =$	0.013435	
$b =$	0.0318		$F =$	0.025678	

5 结 束 语

通过对异形回转体三维尺寸图像测量实验研究,提出了一种在线三维物体非接触测量的新方法:它主要应用图像测量技术和计算机技术,把被测工件的图像当作检测和传递信息的载体;由光学测量系统和计算机,在线非接触式地获取了大量的被测工件的边缘点数据;应用 Marr 边缘检测算子对原始图像的边缘信号进行数据处理,从而获得物体的几何参数;并根据测量数学模型和测量要求,计算处理得到物体三维尺寸的测量结果,并应用标准样块零件对系统进行标定,从而获取高精度的测量结果。

参 考 文 献

- [1] 邹仲力. 提高 CCD 尺寸测量分辨率的解调测量方法. 仪器仪表学报, 1986, 7(1): 38~ 45
- [2] 汪涛等. 一种新的边缘检测算法. 电子学报, 17(1): 1~ 8
- [3] Marr D C, Hildreth E C. Theory of Edge Detection. Proceedings of the Royal Society of London, 1980, B207: 187~ 217
- [4] 徐 兵. 高精度边缘检测方法的研究. 光学机械, 1991, 2: 20~ 22

Study on an Image Measurement for Irregular Rotary Objects

Miao Xiue

(Mechatronic Engineering Dept. South China Univ. of Technology, Guangzhou 510641)

Xiao Shali, Zhong Xianxin, Chen Yu

(Optoelectronic Precision Instruments Dept. Chongqing Univ., Chongqing 630044)

Abstract

An image metrology method using linear array CCD camera is discussed in this paper. With the digital display working table that can move in Z, Y dimensions and rotate around the Z-axis, the 3-D external profile of an irregular rotary object is detected. In order to get the sub-pixel resolution, the original data image from CCD is processed by Marr's edge position detecting algorithm, and the zero-cross position is detected by the least square fitting method. In the measurement of an irregular rotary part which has the size of $\Phi 200$ mm, the measure resolution of the detecting system reaches the μm level.

Keywords: Position measurement, Linear array CCD, Edge detection

缪秀娥 女, 1945年9月生, 1969年毕业于华南工学院(现华南理工大学)机械工程系, 现为华南理工大学机电工程系副教授, 长期从事计测研究。