

基于机器视觉的大型球墨铸铁管直径测量系统

孙亮, 陈占春, 姚爱英, 刘瑾, 李开国

(太原理工大学机械运载与工程学院, 山西太原 030024)

摘要: 为了提高大型球墨铸铁管的直径测量精度和效率, 建立了一种基于机器视觉的大型球墨铸铁管直径测量系统, 分析图像特点, 提出了一种基于邻域灰度值差异的边缘检测方法。检测系统是由一台CCD相机、LED光源和计算机组成的机器视觉测量系统。CCD相机采集图像, 对图像进行图像滤波、图像分割、图像边缘检测和图像亚像素边缘检测的处理后, 提取管材的边缘轮廓, 利用最小二乘法将管材两边缘点拟合为两直线, 根据相机成像的小孔成像原理和圆柱物体的成像特性计算管材直径, 建立了相应的数学模型。实验证明, 本系统可以精确、高效的实时检测管的直径大小, 测量误差小于0.1 mm, 符合实际测量的需要, 具有很高的实用价值。

关键词: 机器视觉; 图像处理; 直径测量; 最小二乘法

球磨铸铁管主要用于自来水的输送, 是自来水管道理想的选择用料, 随着现代工业化的高速发展, 城市供水和工业供水系统对球磨铸铁管的需求增大, 同时, 对其几何参数的精度要求也越来越高, 直径是球磨铸铁管最重要的参数之一, 对其进行直径测量时, 人工测量法测量效率偏低, 测量结果受个人经验和测量仪器精度的影响, 测量结果不稳定。机器视觉测量技术的发展迎合了大型球墨铸铁管的直径测量需求, 其即能提高测量精度和测量效率, 同时, 这种非接触式测量方法不会对管的表面造成任何损伤。目前国内的机器视觉测量技术处于发展阶段, 各种测量技术层出不穷, 聂绍珉等^[1]建立了CCD测量大型锻件的数学模型。于之靖等^[2]介绍了通过改变光积分时间的方式来增强线阵CCD输出信号边缘的特征, 提高了直径检测精度。郝飞等^[3]利用相机的小孔成像原理, 采用两台相机在轴的正上方对轴进行两次拍摄以推算轴的直径, 胡津等^[4]人利用激光与步进电机相结合的方式对轴类锻件直径进行了测量。Shenghua Ye等^[5]将机器视觉与结构光视觉相结合同时测得不锈钢管的直径与直线度。

目前, 机器视觉测量圆柱体零件直径的测量方法多数需要利用参考物, 计算图像中每个像素代表的实际物体长度, 这就需要保证CCD相机与待测工件具有精确且固定的几何位置关系, 需要相应的夹持装置来固定待测工件, 夹持装置的生产误差和待测件的安装误差引入了测量结果中。基于上述问题, 本文提出了一种基于机器视觉的大型球磨铸铁管直径测量方法。

1 测量方法和测量原理

调节相机成像平面与运输台平面平行, 计算相机成像平面与运输台平面的距离 L , 将管材置于运输台平面上, 启动运输台, 使管材沿着轴线方向移动, CCD相机获取管材图像, 并截取目标区域, 利用图像处理技术提取管材边缘点在像素坐标系下的坐标, 利用最小二乘法将边缘点分别拟合为两条直线 L_1, L_2 , 两条直线在像素坐标系下的方程分别为:

$$L_1: v = a_1 u + b_1 \quad (1)$$

作者简介:

孙亮(1993-), 男, 硕士生, 主要研究方向机器视觉及图像处理。E-mail: 369479702@qq.com

中图分类号: TG143.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)06-0621-05

基金项目:

山西省自然科学基金项目(201801D121172)。

收稿日期:

2020-01-08 收到初稿,

2020-02-12 收到修订稿。

$$L_2: v=a_2u+b_2 \quad (2)$$

通过像素坐标系与相机坐标系间的转换矩阵计算直线 L_1 与 L_2 在相机坐标系下的方程表达式。

如图1所示,过相机光心 O 分别做两直线 L_1 和 L_2 的垂线 L_3 和 L_4 ,垂足为 A 、 B 。 L_3 和 L_4 与运输台平面的交点为 A' 和 B' 。三角形 $OA'B'$ 的内切圆为管的横截面,内切圆的半径 R 为管的半径。

2 数学模型

设成像平面的一点在像素坐标系中的坐标为 (u, v) ,这一点在图像坐标系中的坐标为 (X_c, Y_c) ,则有下式成立:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx & 0 & -u_0 dx \\ 0 & dy & -v_0 dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

设图像坐标系中一点 (X_c, Y_c) ,其在相机坐标系中的坐标为 (X, Y, Z) ,则有下式成立:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = Z_c \begin{bmatrix} \frac{1}{f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{f} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $Z_c=f$, f 为相机焦距。 (u_0, v_0) 为像素坐标系中主点坐标, d_x 为横坐标方向像素点大小, d_y 为纵坐标方向像素点大小。

通过上述转换矩阵将 L_1 和 L_2 在像素坐标系下的方程转化相机坐标系中的方程,则拟合的直线 L_1 和直线 L_2 在相机坐标系中的方程分别为:

$$a_1 d_x X - d_y Y + d_x d_y (a_1 u_0 + b_1 - v_0) = 0 \quad (5)$$

$$a_2 d_x X - d_y Y + d_x d_y (a_2 u_0 + b_2 - v_0) = 0 \quad (6)$$

成像平面表达式

(以下点及平面坐标均为相机坐标系下的坐标)

$$Z = -f \quad (7)$$

载物台平面表达式:

$$Z = L - f \quad (8)$$

过光心 $O(0, 0, 0)$ 分别做两条与 L_1, L_2 两直线的垂直相交线 L_3, L_4 , L_3 与 L_4 与载物台平面的交点为 A', B' 。

A' 坐标 $(X_{A'}, Y_{A'}, Z_{A'})$,其中:

$$X_{A'} = \frac{k \times (v_0 - b_1 - u_0 a_1) \times dx \times (L - f)}{a_1 f},$$

$$Y_{A'} = \frac{-(k-1) \times (a_1 u_0 + b_1 - v_0) \times dy \times (L - f)}{f}, \quad Z_{A'} = L - f,$$

$$k = \frac{-((a_1 u_0 + b_1 - v_0) \times dy \times a_1)^2}{((v_0 - b_1 - u_0 a_1) \times dx)^2 + (a_1 \times (a_1 u_0 + b_1 - v_0) \times dy)^2}.$$

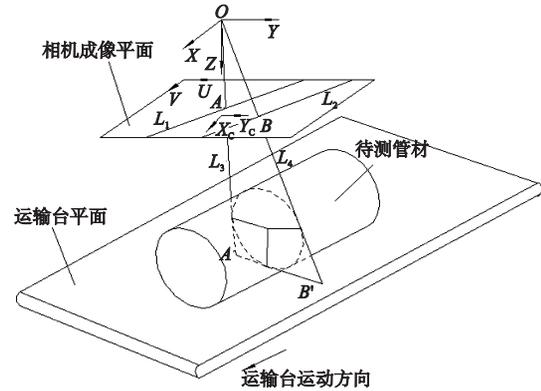


图1 直径测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of diameter measurement

B' 坐标 $(X_{B'}, Y_{B'}, Z_{B'})$,其中:

$$X_{B'} = \frac{k' \times (v_0 - b_2 - u_0 a_2) \times dx \times (L - f)}{a_2 f},$$

$$Y_{B'} = \frac{-(k'-1) \times (a_2 u_0 + b_2 - v_0) \times dy \times (L - f)}{f}, \quad Z_{B'} = -f + L,$$

$$k' = \frac{-((a_2 u_0 + b_2 - v_0) \times dy \times a_2)^2}{((v_0 - b_2 - u_0 a_2) \times dx)^2 + (a_2 \times (a_2 u_0 + b_2 - v_0) \times dy)^2}.$$

已知空间三点坐标 $O(0, 0, 0)$, $A'(X_{A'}, Y_{A'}, Z_{A'})$, $B'(X_{B'}, Y_{B'}, Z_{B'})$,设三角形 $OA'B'$ 边长为 a, b, c ,则:

$$a = \sqrt{X_{A'}^2 + Y_{A'}^2 + Z_{A'}^2}, \quad b = \sqrt{X_{B'}^2 + Y_{B'}^2 + Z_{B'}^2},$$

$$c = \sqrt{(X_{A'} - X_{B'})^2 + (Y_{A'} - Y_{B'})^2 + (Z_{A'} - Z_{B'})^2},$$

$$p = \frac{a + b + c}{2}.$$

三角形 $OA'B'$ 的面积为 S ,根据海伦公式有:

$$S = \sqrt{p \times (p - a) \times (p - b) \times (p - c)}.$$

$$\text{三角形} OA'B' \text{的内切圆直径: } D = \frac{2 \times S}{P}.$$

3 系统硬件组成

系统组成包括一台CCD相机、镜头、背光光源、计算机。在硬件的选型方面,考虑到本次测量的视野范围为 $600 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,检测精度要求为 0.1 mm ,图像处理方面系统采用 $1/2$ 亚像素检测,所以分辨率至少为: $(600 \div 0.1 \div 2) \times (400 \div 0.1 \div 2) = 3000 \times 2000$ 。

综合上述条件,相机选取imperx公司生产的型号为T3340的面阵CCD相机,幅面大小 $4/3''$,分辨率为 3296×2472 。镜头选择kowa公司生产的型号为LM35XC的镜头,焦距为 35 mm ,光源选择LED光源,

照明方式选择前向照明。

4 系统标定

系统标定分为两步，第一步为相机内部参数标定，第二步为相机位姿标定（调节相机成像平面与载物台平面平行）。

4.1 相机标定

相机标定的目的为获取相机内部参数，消除相机畸变。相机标定的精度直接影响直径的测量精度，本文采用MATLAB软件中的Camera Calibrator模块对相机进行标定，标定得到的相机内部参数如表1所示。

4.2 调节相机成像平面与运输台平面平行

调节相机成像平面与载物台平行的目的是保证管材的轴线在相机中的像与管材的轴线本身平行，两者的平行度精度将直接影响测量的精度。本系统采用程涛^[6]在其发明专利中阐述的方法来调节相机光轴与载物台平面垂直，并计算载物台平面与相机成像平面的距离 L 。

5 图像处理

首先截取图像中的目标区域，再对所截取图像进行图像处理，按照图像处理顺序分为：图像灰度化、图像中值滤波、图像二值化、图像的边缘检测，系统的图像处理流程图如图2所示。

5.1 图像灰度化

CCD相机采集的图像为彩色图像，信息量较大，将彩色图像转化为灰度图像后极大程度上减小了计算

量，且不影响目标边缘的提取。灰度化处理是选取一个合适的值，将图像的 R 、 G 、 B 值转换为同一个数值 $Gray(i, j)$ ，本文采用加权平均法对图像进行灰度化处理，加权平均法是根据图像或其他条件来选取 R 、 G 、 B 的比例系数，计算公式为：

$$Gray(i, j) = W_R \times R(i, j) + W_G \times G(i, j) + W_B \times B(i, j) \quad (9)$$

式中： W_R 、 W_G 、 W_B 分别为 R 、 G 、 B 的权值系数。经过大量的实验数据验证，当 W_R 、 W_G 、 W_B 分别取0.3、0.59、0.11时，即：

$$Gray(i, j) = 0.3 \times R(i, j) + 0.59 \times G(i, j) + 0.11 \times B(i, j) \quad (10)$$

能够得到人眼识别度最高的灰度图像。本文将0.3、0.59、0.11作为 R 、 G 、 B 的权值系数，采用加权平均法对图像进行灰度化处理。图3可以看出加权平均法具有较好的灰度化效果。

5.2 图像去噪

噪声普遍存在于大多数的图像中，通常在图像摄取和传输时产生，中值滤波法对消除椒盐噪声非常

表1 相机内部参数

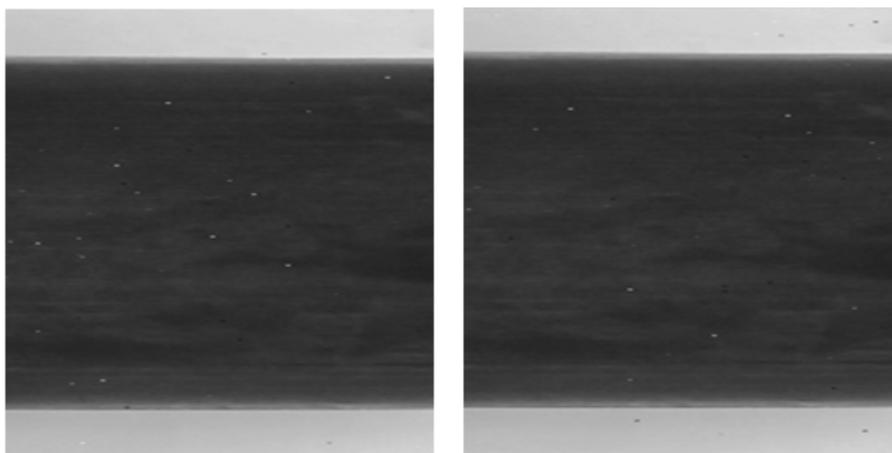
Table 1 Internal parameters of camera

f/mm	$d_x/\mu\text{m}$	$d_y/\mu\text{m}$	u_0	v_0	K_1	K_2
35	5.5	5.5	1 642.6	1 242.7	0.104	-0.102



图2 图像处理流程图

Fig. 2 flow chart of image processing



(a) 区域一

(b) 区域二

图3 灰度化图像

Fig. 3 Gray image

有效,且中值滤波能很好地保护图像的边缘信息不被破坏,中值滤波的基本原理是将数字图像或数字序列中一点的值用该点的一个邻域中各点值的中值代替,让周围的像素值接近的真实值,从而消除孤立的噪声点, $f(x, y)$ 为原图像灰度值, $g(x, y)$ 为滤波后灰度值,则有下式成立:

$$g(x, y) = \text{Median} \{f(i, j), i, j \in A\} \quad (11)$$

其中: A 是以 (x, y) 为中心的像素点集合。

系统采用[3, 3]的方形模板对图像进行了滤波处理。图4可以看出,中值滤波即能很好地消除了噪声,又保存了图像的边缘信息。

5.3 图像二值化

图像二值化是指通过设定阈值 T ,使图像中目标与背景分割为黑白分明的两部分(图5),这样有利于后续图像的处理。灰度化后的图像像素值的分布

为0~255。设点 (X, Y) 的灰度值为 $F(x, y)$,若 $F(x, y) \geq T$ 则 $F(x, y) = 1$,若 $F(x, y) < T$,则 $F(x, y) = 0$,并按下式进行图像分割处理:

$$F(X, Y) = \begin{cases} 1 & F(X, Y) \geq T \\ 0 & F(X, Y) < T \end{cases} \quad (12)$$

5.4 边缘检测

分析二值图像可知,图像中目标与背景间的灰度值差异很大,且目标区域较集中,基于上述特点,本文提出一种基于邻域灰度值差异的边缘检测法(图6)。当图像中的一点灰度值 $g(x, y) = 0$ 时,进一步判断其邻域点 $g(x+1, y)$, $g(x-1, y)$, $g(x, y+1)$, $g(x, y-1)$ 的灰度值,如果满足式:

$$\begin{aligned} &g(x+1, y) \parallel g(x-1, y) \parallel g(x, y+1) \\ &\parallel g(x, y-1) = 1 \end{aligned} \quad (13)$$

则认定点 (x, y) 为边缘点。

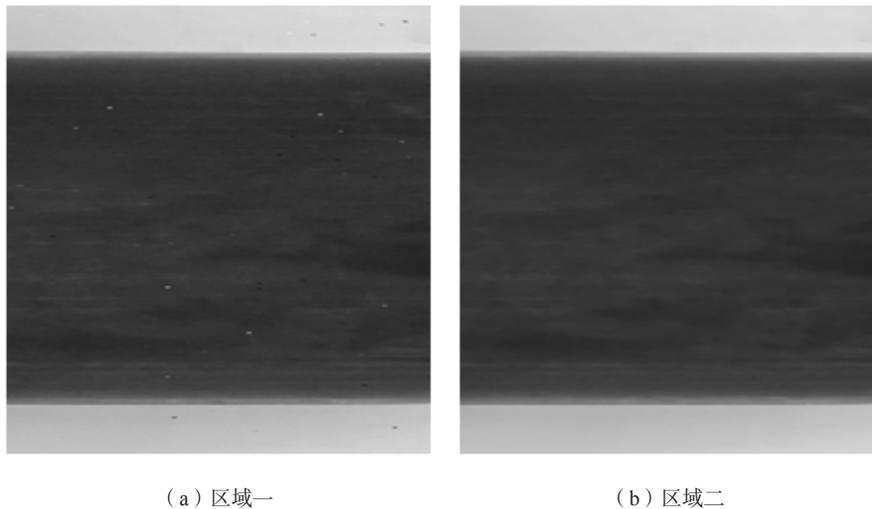


图4 中值滤波效果图

Fig. 4 Image of Mid-value filtering

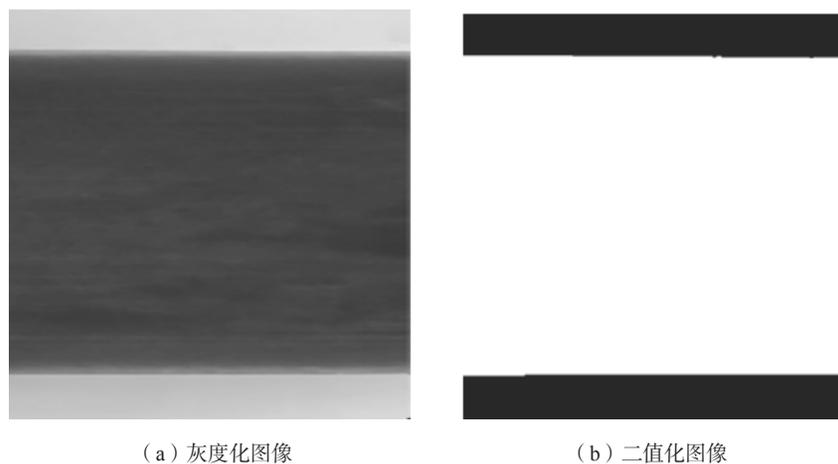


图5 图像二值化效果图

Fig. 5 Binary image

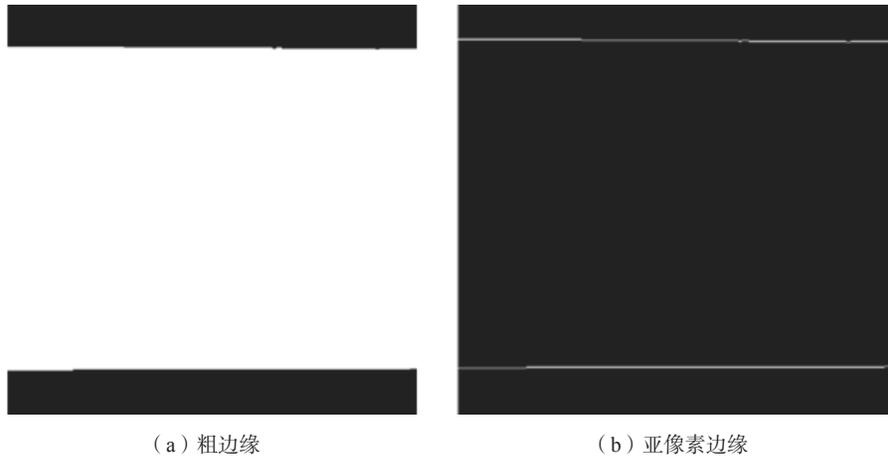


图6 邻域灰度值差异法边缘检测图

Fig.6 Image of pipe edge using the method of neighborhood gray value difference

在得到了图像粗边缘后，利用双线性差值的亚像素边缘检测法提取图像的亚像素边缘，双线性插值算法是对一个像素设置坐标，利用反向变换得到此像素点的浮点坐标 $(i+u, j+v)$ ，其中 i, j 为浮点坐标的整数部分， u, v 为浮点坐标的小数部分，浮点坐标的像素值为 $F(i+u, j+v)$ ，其中：

$$F(i+u, j+v) = (1-u) \times (1-v) \times F(i, j) + u \times v \times F(i+1, j+1) + v \times (1-u) \times F(i, j+1) + u \times (1-v) \times F(i+1, j) \quad (14)$$

本文选择使用双线性差值对图像的行列值各放大两倍，得到亚像素边缘点。

6 直线拟合

通过最小二乘法将图像中两边缘点拟合为两条直线 L_1, L_2 。上边缘点待拟合的点坐标为 (u_i, v_i) ， $i=1 \cdots n$ ， n 为上边缘点数目，拟合的直线为：

$$L_1: v=a_1u+b_1$$

下边缘点待拟合的点坐标为 (u_j, v_j) ， $j=1 \cdots m$ ， m 为下边缘点数目，其中：

$$L_2: v=a_2u+b_2$$

$$a_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n u_i v_i - \sum_{i=1}^n u_i \sum_{i=1}^n v_i}{n \sum_{i=1}^n u_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n u_i \right)^2} \quad (15)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n u_i^2 \sum_{i=1}^n v_i - \sum_{i=1}^n u_i \sum_{i=1}^n u_i v_i}{n \sum_{i=1}^n u_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n u_i \right)^2} \quad (16)$$

$$a_2 = \frac{m \sum_{j=1}^m u_j v_j - \sum_{j=1}^m u_j \sum_{j=1}^m v_j}{m \sum_{j=1}^m u_j^2 - \left(\sum_{j=1}^m u_j \right)^2} \quad (17)$$

$$b_2 = \frac{\sum_{j=1}^m u_j^2 \sum_{j=1}^m v_j - \sum_{j=1}^m u_j \sum_{j=1}^m u_j v_j}{m \sum_{j=1}^m u_j^2 - \left(\sum_{j=1}^m u_j \right)^2} \quad (18)$$

得到两条拟合直线的方程后，将 a_1, a_2, b_1, b_2 带入上述数学模型中，计算轴直径。

7 试验结果及数据分析

试验过程中，选取4种直径不同的管，分别对处于静止状态的同一管的同一位置进行3次测量，测量结果如表2所示。

表2 管材直径测量数据
Table 2 Pipe diameter measurement data mm

项目	管1	管2	管3
测量值1	350.196 3	400.153 6	449.906 2
测量值2	350.203 5	400.186 7	449.836 4
测量值3	350.168 3	400.116 7	449.875 4
方差	0.000 346	0.001 226	0.001 224
平均值	350.189 4	400.152 3	449.872 7
三坐标仪测量值	350.158 6	400.127 5	499.862 5
平均值误差	0.030 766	0.024 833	0.010 200

分析测量数据可知，测量结果与三坐标机器测量结果相比误差均小于0.1 mm，同一管同一位置测量值的平均值误差小于0.05 mm，测量精度达到了生产要求。同组测量值的方差小于0.002，说明测量结果稳定。在确定测量精度达到了测量要求后，接下来对处于运输台上的行进中的球磨铸铁管进行了直径测量，管沿着其轴线方向前进，CCD相机连续拍照，相机拍照间隔为3 s，测量出同一管不同位置的直径，并将测量结果显示在直角坐标系中。图7为同一管不同位置的直径分布图，图7可以看出，随着管的运动，系统测量

出了管不同位置的直径大小，并将所测直径值与生产允许的最大值和最小值相比较，判断整个管直径是否符合生产要求。

8 结束语

本文设计了一种基于机器视觉的球墨铸铁管直径测量系统，分析管的图像特点，提出了一种基于邻域灰度值差异的边缘检测方法，并使用1/2亚像素边缘检测方法，进一步提高了测量精度，利用最小二乘法将管两边缘拟合为两直线，利用相机的小孔成像原理计算管直径，通过实验证明了系统的直径测量误差小于0.1 mm，实现了整根管的直径在线测量，能更全面的掌握管直径分布情况，及时剔除不符合生产规格的管，相较于其他机器视觉测量方法，本文提出的方法不需要参考物进行标定，消除了参考物的生产误差对

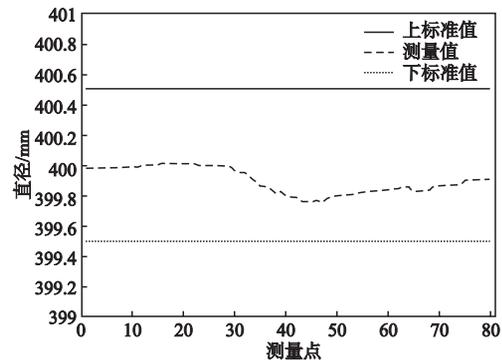


图7 管的直径分布图

Fig. 7 Pipe diameter distribution diagram

测量结果的影响。在测量时不需要保证球墨铸铁管具有固定的位姿，适合应用于大直径球磨铸铁管的直径测量。

参考文献:

- [1] 聂绍珉, 张庆, 李树奎, 等. 大型锻件尺寸CCD测量的数学模型研究 [J]. 塑性工程学报, 2006, 13 (6): 110-113.
- [2] 于之靖, 刘月林, 诸葛晶昌. 高精度双线阵CCD非接触直径测量系统 [J]. 传感器与微系统, 2014, 33 (1): 120-122.
- [3] 郝飞. 机器视觉测量关键技术研究及在细长轴中应用 [D]. 江苏: 东南大学, 2015.
- [4] 胡津, 魏青轩, 刘浩. 基于激光的非接触锻件直径在线测量的研究 [J]. 大型铸锻件, 2019 (3): 50-51.
- [5] YE Shenghua, SUN Changku, QIU Yu, et al. Online machine vision method for measuring the diameter and straightness of seamless steel pipes [J]. Optical Engineering, 2001, 40 (11): 2565-2571.
- [6] 深圳大学. 线阵CCD相机成像平面与工作台平行度的测量方法和系统: CN201510623312.2 [P]. 2016-01-06.
- [7] 胡松, 王道累. 摄像机标定方法的比较分析 [J]. 上海电力学院学报, 2018, 34 (4): 366-370.
- [8] 马贺贺. 基于结构光视觉的大型锻件尺寸测量系统研究与应用 [J]. 装备机械, 2015 (4): 6-10.
- [9] 蒋志年, 易其顺. 基于CCD的非接触式直径测量实验的数据处理 [J]. 广西民族师范学院学报, 2013 (3): 22-24.
- [10] 丁成波, 刘蜜, 刘超. 基于机器视觉的动态环境下小尺寸轴检测系统 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019 (4): 78-80.

Diameter Measurement System of Large Ductile Iron Pipe Based on Machine Vision

SUN Liang, CHEN Zhan-chun, YAO Ai-ying, LIU Jin, LI Kai-guo

(College of Mechanical and Vehical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract:

In order to improve the accuracy and efficiency of diameter measurement of large PE pipe, a machine vision measurement system for the pipes with large diameter was established. An edge detection method based on the differences of neighborhood gray values was proposed according to the characteristics of the image. The measurement system is a machine vision measurement system consisting of a CCD camera, a LED light source and a computer. The CCD camera takes the image. The methods of image filtering, image segmentation, image edge detection, and image sub-pixel edge detection are used to extract the edges of the pipe. The two edges of the pipe are fitted into two straight lines using the least square method. Based on the principle of small hole imaging and the imaging characteristics of cylindrical objects, the diameter of the pipe is calculated, and the corresponding mathematical model is established. The experiment proves that the system can accurately and efficiently detect the diameter of the pipe in real time, with error of less than 0.1 mm, which meets the requirements of actual production. The diameter measurement system has good practical value.

Key words:

machine vision; image processing; diameter measurement; the least squares method