

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2020.02.009

# CCD 高速线材测径仿真系统的设计

吴海滨, 李梦楠, 陈新兵, 侯东旭, 何涛

(安徽大学物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 设计了由平行光源、双远心镜头、面阵 CCD 摄像机和待测物等部分组成的高精度线材测径仿真系统。考虑到实验系统是为了模拟完成高速线材的拍摄测量, 在线材轧制过程中其径向速度可以高达 100 m/s, 同时存在横向跳动的迹象, 所以在光学设计中采用具有固定放大倍率的远心镜头, 确保当物距改变时光敏面上的图像大小不发生变化; 并且选用的面阵 CCD 最快曝光时间可以达到 1  $\mu$ s, 从而可以得到实时反映被测物体尺寸的高清图像。实验结果表明: 使用该仿真系统测量出的工件直径精度可以达到 20  $\mu$ m, 足以满足生产需要。

**关键词:** 双远心镜头; 机器视觉; 面阵 CCD 相机; 高速线材

**中图分类号:** TP216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6141(2020)02-0154-07

## Design of CCD High Speed Wire diameter Measurement Simulation System

WU Haibin, LI Mengnan, CHEN Xinbing, HOU Dongxu, HE Tao

(Physics and Material Science School of Anhui University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** A high precision wire diameter measurement simulation system is designed, which is composed of parallel light source, double telecentric lens, CCD camera and object to be tested. Considering that this experimental system is designed to simulate the photography and measurement of high-speed wire, the radial velocity of wire rod can be as high as 100 m/s in the rolling process, and there are signs of transverse runout. Therefore, in the optical design, a telecentric lens with a fixed magnification rate is used to keep the image size on photosensitive surface unchanged when the distance is changed. Moreover, the maximum exposure time of the selected plane array CCD can reach 1  $\mu$ s, thus a high-definition image reflecting the size of the measured object can be obtained in real-time. The experimental results show that the diameter accuracy of the workpiece measured by the simulation system can reach 20  $\mu$ m, which can meet the needs of production.

**Key words:** double telecentric lens; machine vision; plane array CCD camera; high speed wire

**基金项目:** Supported by Ministry of Science and Technology Innovation Fund Project ( 科技部创新基金, 07C26213400516)

**作者简介:** 吴海滨 ( 1962 - ), 男, 安徽合肥人, 硕士, 高级工程师, 研究生导师, 主要从事特种工业电视系列产品的开发设计及图像信息处理等方面的研究。 **E-mail:** whb62@163.com

**收稿日期:** 2019-03-05; **修改日期:** 2019-04-01

## 1 引言

21 世纪随着人工智能普遍化的提出, 作为人工智能其中的一个重要分支, 机器视觉在精密仪器领域的应用显著提高。近年来, 机器视觉<sup>[1-2]</sup> 尺寸测量系统在国内测量领域得到了蓬勃的发展, 与传统的卡尺、工具显微镜和投影测量仪相比, 高速度、非接触、可移动范围大都是此系统的优点。机器视觉是一种旨在代替人眼视觉对世界万物进行观察判断与检测的技术, 尤其是在很多高危产业线中以及高精度生产线中。

传统的直接接触测量方法存在以下缺点: 1) 易受到人为主观因素影响; 2) 人力不能时时刻刻进行测量; 3) 产生测量误差与系统误差。因此机器视觉非接触测量系统的引入, 相比传统的直接接触测量方法不仅节省了人力物力, 减小误差, 同时提高了产业效率。本工作设计了一种基于双远心透镜的工业工件尺寸高精度测量仿真系统, 可用于被测工件的机器测量。

## 2 硬件系统

### 2.1 测径系统原理

测径系统原理示意图如图 1 所示。光源发出的平行光照射到被测物体上, 光束穿过时被测工件部分会产生遮挡, 这样会出现两部分区域, 进而在 CCD 光敏面上形成不同的成像。其中遮挡部分导致的阴影区域即是被测工件的直径区域, 读取其直径值再根据光学系统的放大倍率即可求出被测工件的真实直径值

$$d = \frac{c \times n}{\beta}, \quad (1)$$

其中,  $d$  代表被测工件的直径;  $c$  代表像元尺寸大小;  $n$  代表待测物在 CCD 光敏面上所占有的像素点数目<sup>[3]</sup>,  $\beta$  是光学成像系统放大倍率。

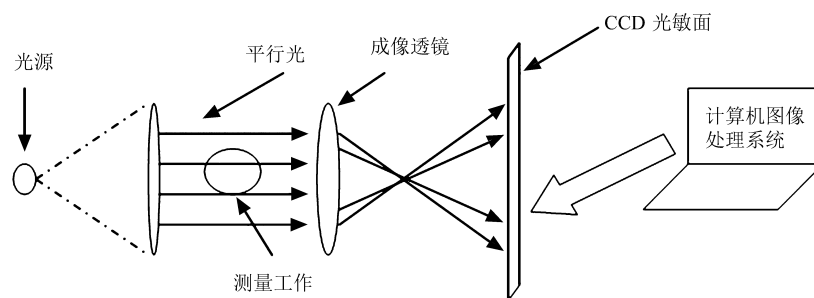


图 1 成像系统原理图

Fig.1 Imaging system schematic diagram

### 2.2 远心镜头的选择

在机器视觉中, 镜头会替代人的眼睛捕捉画面, 经过视觉成像进行图像识别与检测等处理。选择镜头的参照指标是根据镜头的性能参数是否能满足实验要求, 鉴于实验过程中被测物体模拟高速线材存在抖动, 因此所选用的镜头需要满足当物距发生一定距离的变化时, 所获得的图像不产生明显的扭曲与畸变, 即物象比例保持不变。而普通的实用镜头所成像的大小会随着目标物体离镜头的距离远近而产生相应的变化, 呈现出近大远小。

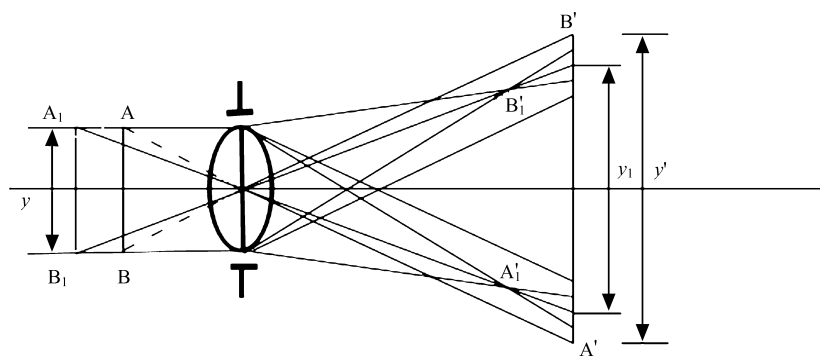


图2 传统镜头成像系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of traditional lens imaging system

以传统显微镜为例，孔径光阑对光束有约束力。由图2可以发现当物镜与孔径光阑位于同一位置时，目标物体AB所成的像为A'B'，此时我们规定A'B'的平面为标尺面。而当物体AB移动位置到A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>时为了得到较为清晰的图像，可通过调焦来获得结果，但传统镜头通过调焦会影响其成像的大小造成视差得到A'<sub>1</sub>B'<sub>1</sub>。即当物距发生变化时，传统镜头成像会发生视差，不满足本实验模拟测量高速线材的要求。

为纠正传统镜头产生的视差，在机器精密测量应用中，倾向于选择远心镜头。远心镜头大致可分为三类：1) 像方远心镜头，将孔径光阑放置在物方焦平面上，使得像方主光线平行于光轴<sup>[4]</sup>，虽然CCD芯片的安装位置发生变化，在CCD芯片上投影成像大小不变。2) 物方远心镜头，在光学系统的像方焦平面上放置孔径光阑，当孔径光阑放在像方焦平面上时，即使物距发生改变，像距也发生改变<sup>[5]</sup>，但像高保持不变，即测得的物体尺寸不会变化。3) 双远心镜头，结合了上述两种镜头的优点，物体离得远近或者相机离得远近都不影响放大倍数。在上述三种远心镜头中双远心镜头的适用范围最广，它可以有效规避物距变化与CCD位置不稳定的情况，给实验的可操作性提供了良好的条件。

在工业精密线性测量中使用双远心透镜，相机经常需要校准。在传统透镜的测量过程中，拍摄间隔一直在改变，但由于许多被测物放置不准确，导致视差严重，无法利用测量软件准确获得反映真实物体的图像。为了解决这一问题，双远心透镜在透镜孔径中间放置光阑，使透镜内外的光成为平行光，通过这个过程，其它光被光阑遮挡，无法被CCD芯片接收。双远心透镜具有畸变系数小、场深大的特点<sup>[6]</sup>。双远心镜头的成像原理如图3所示。

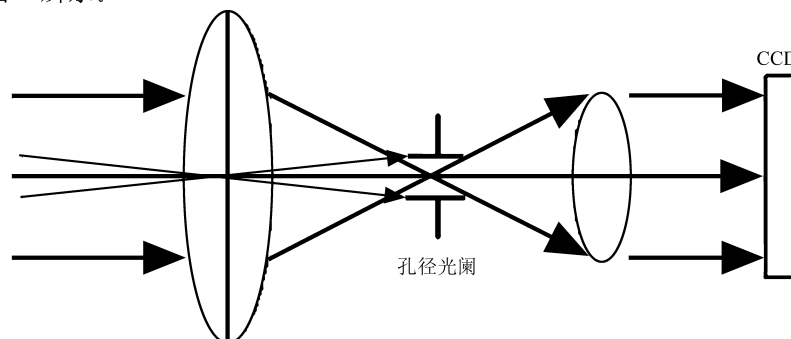


图3 双远心镜头成像系统原理图

Fig.3 Principle diagram of double telecentric lens imaging system

### 2.3 光学结构

设计的光学系统由一组光学元件和相关的机械支撑件组成。选择ETL0.133-180-60型号双远心透镜作

为成像透镜, 其远心度和视场深度相当高, 畸变率很低。该透镜能在较宽的范围内反射稳定、清晰的成像, 灵活的应用于精密测量系统。为了与大口径双远心镜头匹配系统, 选择 44 mm 口径的 LED 背光源。由于实验中需要光源连续不断地工作进行长时间的数据采集, 因此光源应具有成本低、寿命长等特性。

## 2.4 图像采集

目前已存在的测径系统中绝大部分使用的是线阵 CCD<sup>[7]</sup>(电荷耦合器件), 原因是其具有像元尺寸小、灵活性高、输出的信号易于数字化处理等优点。但是顾名思义线阵 CCD, 每次扫描时只能扫描一条直线。而本实验中的被测物体是对高速线材的模拟测量, 若线材在检测区域内存在跳动现象, 线阵 CCD 没有办法进行实时捕获。被测线材因为其存在径向和横向的跳动问题, 采集图像信息时会出现如图 4 倾斜的情况。线阵 CCD 在采集时因为只扫描一条线, 横截面相切的点 AB 并不是被测线材的真实直径值, AB' 才是直径真实测量值, 即检测值  $D > d$ , 其中  $D$  为检测值,  $d$  为实际值, 便会对最终的直径测量带来系统误差。可见其更偏向于一维静态状态下的测量。针对线阵 CCD 测量中的不足之处, 本实验更倾向于选用面阵 CCD。面阵是指把 CCD 像素排列成一个平面, 简单来说是一维线阵 CCD 的光敏单元和移位寄存器的叠加进而排列成二维阵列, 因此可以获得清晰的二维图像。同样, 在用面阵 CCD 进行测量时, 采集得到的图片也会出现倾斜的情况, 这时候因为使用面阵 CCD, 可以对多条直线进行扫描, 会出现如图 5 的情况, 得到图片信息传输到计算机语言对其进行相关处理后得到点的坐标数据计算出  $H, L$  的值, 根据正切关系得到角度  $\alpha$ , 通过计算机语言计算得出使用面阵 CCD 进行测量时检测值  $D$  几乎近似于实际值  $d$ , 可见使用面阵 CCD 相比线阵 CCD 更有利于测量被测目标处于跳动状态的情况。

$$\tan \alpha = \frac{H}{L}, \quad (2)$$

$$d = D \sin \alpha. \quad (3)$$

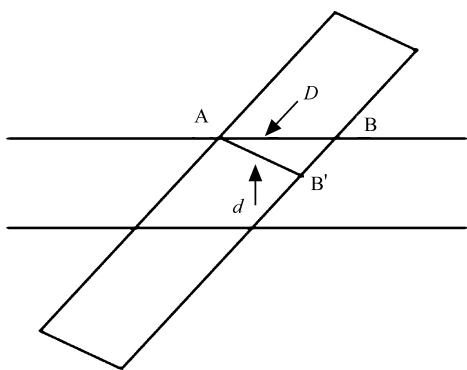


图 4 线阵 CCD 测量倾斜时的图像采集效果  
Fig.4 Image acquisition effect of linear CCD measurement of in clination

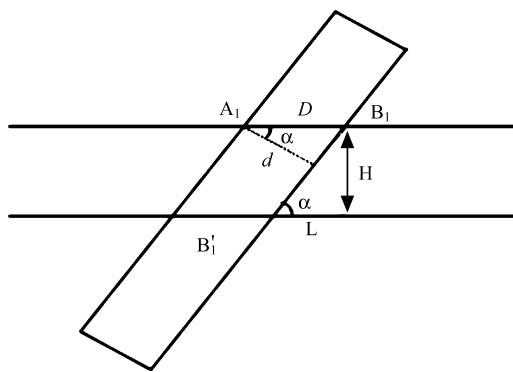


图 5 面阵 CCD 测量倾斜时的图像采集效果  
Fig.5 Image acquisition effect of array CCD measurement of in clination

为了得到清晰的二维图片信息, 本实验选用型号为 IMB-716G 面阵 CCD 摄像机作为工业相机, 它是一种价格低廉的工业 GigE 相机, 外形紧凑, 金属外壳坚固, 可拍摄 30 fps 的视频。在实际生产过程中, 其参数如下:

有效像素: 130 万

图像分辨率: 1288 pixel × 964 pixel

帧率: 30 FPS

靶面尺寸: 1/3CCD

像元尺寸:  $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$

观察相机发现有 4 个像素点的误差, 允许误差范围  $20 \mu\text{m}$ 。

### 3 图像预处理

1) 平滑滤波: 图片信息在采集过程中会受到工作环境以及实验条件的影响而不可避免地产生噪声, 从而降低了图像质量, 使图像分割等后续处理变得困难。因此, 在从图像中提取各种特征之前, 需要对图像进行平滑去噪处理。这里选择使用非线性中值滤波处理方法<sup>[8]</sup>, 它不仅有效地抑制图像噪声, 还能保护边缘轮廓信息。中值滤波的基本原理是: 使用大小为  $M \times N$  的二维滑动模版  $W$ , 根据像素灰度值的大小对滑动窗口覆盖区域中的各个点进行排序, 中间位置值代替中心像素的灰度值。

$$g(x, y) = \text{Median}\{f(x - k, y - l), (k, l) \in W\} . \quad (4)$$

2) 二值化: 图像分割本质上是提取图像中感兴趣的部分, 图像二值化的本质是根据一定的规则选择最优的阈值, 从而最优地区分出背景和目标。目标的像素值被标记为 0, 而背景值被标记为 255,

$$g(x, y) = \begin{cases} 255 & f(x, y) > T_h \\ 0 & f(x, y) < T_h \end{cases} , \quad (5)$$

源图像是  $f(x, y)$ , 处理后的图像是  $g(x, y)$ ,  $T_h$  为阈值。

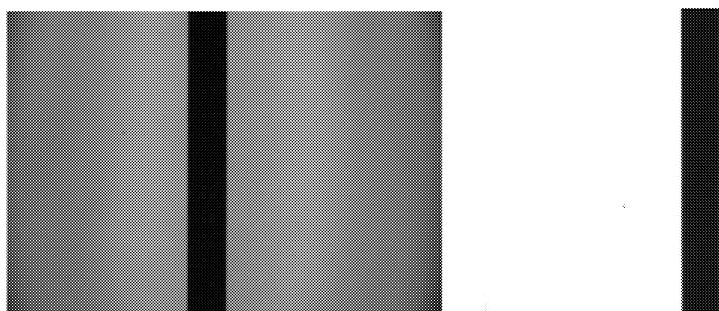


图 6 处理前后图片对比

Fig.6 picture Contrast before and after processing

### 4 数据分析

实验中对标准物的标定是在游标卡尺下进行的, 游标卡尺的精度为  $0.01 \text{ mm}$ , 利用 Matlab 将采集到的视频中每一帧图片取 5 个横截面, 取 5 个截面得到的直径值求平均。为了减小误差, 以  $0.5 \text{ s}$  的间隔对视频中的每一帧图片得到的直径值由程序加权平均得到被测物的测量直径值。

每张图片不同横截面的灰度图, 绘制出边缘点的峰值图。如图 7 所示。

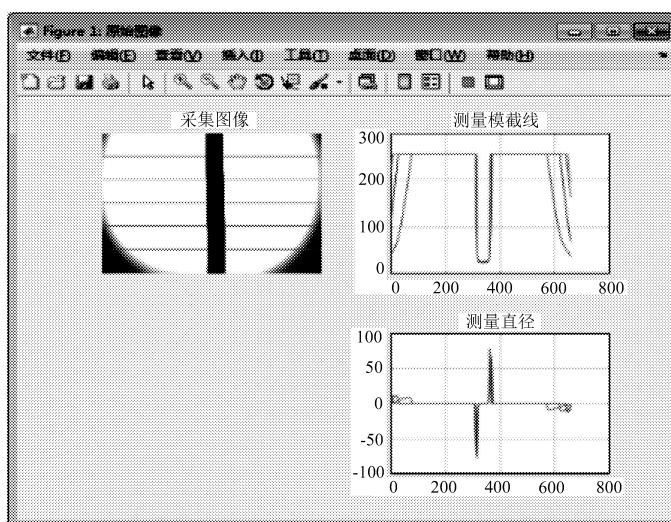


图 7 Matlab 中对图片信息的处理

Fig.7 Processing of picture information in Matlab

对图片进行最佳差分法<sup>[9]</sup>进行计算, 将同一帧图片上取多个横截面求直径, 根据程序语言求出平均值。同时用游标卡尺对被测物进行标定, 得出以下数据, 见表 1。

表 1 测量结果

Table 1 Measurement results

Product	Standard value(mm)	Measured value(mm)	Error(mm)
1	1.98	1.98	0
2	2.98	2.96	0.02
3	4.99	4.99	0
5	7.98	7.97	0.01
6	9.60	9.62	0.02

注: 放大倍率 0.13

## 5 结 论

介绍了一种基于双远心镜头的 CCD 高精度工业工件尺寸测量系统的设计。首先, 对图像进行平滑滤波和二值化处理得到被测工件的清晰轮廓。用 Matlab 对采集图片进行最佳差分数学计算得到被测工件的测量值, 发现可以满足在  $20\ \mu\text{m}$  精度范围之内。

该系统完成了机器自动测量提高了现代工业自动化的效率, 能够实现批量工件尺寸的检测, 既降低了检测成本, 又避免了人为因素造成的误差。随着技术的进一步发展和算法的进一步完善, 该测量系统不仅具有越来越高的精度, 其应用范围也会越来越广。

## 参考文献:

- [1] Chen Ying. Research on the development and application dynamics of machine vision technology [J]. *Wireless Internet Technology*, 2018, **15**(19): 147-148 (in Chinese).

- 陈 英. 机器视觉技术的发展现状与应用动态研究 [J]. 无线互联科技, 2018, **15**(19): 147-148.
- [2] Zhang Yongbo. *Research on the Technology of Product Part Size Detection Based on Machine Vision* [D]. Qinhuangdao: Master's Thesis of Yanshan University, 2017 (in Chinese).  
张永波. 基于机器视觉的产品零件尺寸检测技术研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学硕士论文, 2017.
- [3] Zhang Xiaoming. *Research on Automatic Measurement System of Small Axle Diameter Parts Based on CCD* [D]. Xi'an: Master's Thesis of Xi'an University of Technology, 2010 (in Chinese).  
张晓明. 基于 CCD 的小轴径零件全自动测量系统研究 [D]. 西安: 西安理工大学硕士论文, 2010.
- [4] Xia Bing, Wang Min, Guo Qiaoshuang, et al. Dual telecentric optical system for image measurement of small parts [J]. *Optical Instrument*, 2015, **37**(04): 314-318 (in Chinese).  
夏 兵, 王 敏, 郭巧双, 等. 用于小零件图像测量的双远心光学系统 [J]. 光学仪器, 2015, **37**(04): 314-318.
- [5] Lai Ming, Lan Shan, Huang Guangyan, et al. Digital high-speed camera test technology and its application [J]. *Experimental Technology and Management*, 2012, **29**(06): 51-54,74 (in Chinese).  
赖 鸣, 兰 山, 黄广炎, 等. 数字式高速摄像测试技术及其应用 [J]. 实验技术与管理, 2012, **29**(06):51-54,74.
- [6] Shao dalang. Advertising photography (3) depth of field control in advertising photography[J]. *Photosensitive material*, 2000 (04): 31-32, 37 (in Chinese).  
邵大浪. 广告摄影讲座 (3) 广告摄影中的景深控制 [J]. 感光材料, 2000(04): 31-32,37.
- [7] Xichao, Deng Nianmao, Wang Haiqing, et al. Research on two-dimensional reference large field of view transfer method based on linear array CCD [J]. *Applied Optics*, 2016, **37**(04): 584-589 (in Chinese).  
习 超, 邓年茂, 王海青, 等. 基于线阵 CCD 的二维基准大视场传递方法研究 [J]. 应用光学, 2016, **37**(04): 584-589.
- [8] Wang Hongyu, You Minjuan, Li Qi, et al. An improved median filtered image denoising algorithm [J]. *China Science and Technology Information*, 2019 (01): 84 -85 (in Chinese).  
王红宇, 游敏娟, 李 琪, 等. 一种中值滤波图像去噪的改进算法 [J]. 中国科技信息, 2019(01): 84-85.
- [9] Li Jiangtao. *The Study and Application of the Best Difference Method* [D]. Chengdu: Master's Thesis of Chengdu University of Technology, 2006 (in Chinese).  
李江涛. 最佳差分方法研究及应用 [D]. 成都: 成都理工大学硕士论文, 2006.