

基于结构光和机器视觉的尺寸测量及其误差分析

钟飞, 吴雪茹

(湖北工业大学, 武汉 430068)

摘要: 为了解决流水线上产品的尺寸自动测量难的问题, 基于目前机器视觉在尺寸测量方面的应用, 介绍了用机器视觉来检测线圈绕线质量的方案。采用简化了的针孔模型对相机进行标定, 并针对 CCD 成像元的不均匀性, 提出改进方案并对测量结果进行误差修正, 通过实验完善并验证了该方案的可行性, 为机器视觉测量尺寸提供理论基础。

关键词: 误差分析; 机器视觉; CCD; 结构光

中图分类号: TB486; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)09-0066-04

Size Measurement and Error Analysis of Machine Vision Based on Structured Light

ZHONG Fei, WU Xue-ru

(Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: A project of using machine vision to detect the quality of coil winding was introduced based on current application of machine vision in size measurement to solve the difficulty of measuring product size on production line. A simplified pinhole model was applied to calibrate camera. Improvement method to correct measurement error was put forward to solve the nonuniformity problem of CCD imaging unit. The feasibility of the method was verified. The purpose was to provide reference for size measurement by machine vision.

Key words: error analysis; machine vision; CCD; structured light

在自动化进展迅速的流水线生产领域, 需要不断开发出各种自动测量装置, 然后向中心处理装置输入单件产品的各种数据。从测量技术方面看, 自动测量物件的外形尺寸和体积是该领域的难点, 在计算批量产品的仓储容量从而进行有效地包装运输以及存放时, 该技术就成为了一门关键技术。文中研究的视觉测量系统适用于非接触式以及各种图像传感的在线监测, 不但解决了流水线领域的产品尺寸在线测量, 近年来在包装印刷领域对比较精细印刷品进行监测控制方面得到了广泛的应用^[1]。在诸多的视觉方法中, 结构光三维视觉还扩展了大量程、大视场、较高精度、光条图像信息的易于提取、实时性强及主动受控等特点。

CCD 电荷耦合器件于 1969 年在贝尔实验室研制成功以后, 由日商开始量产, 其发展过程历经 30 多

年。由于其具有高灵敏度、低噪声、长寿命、低功耗和高可靠性等优点, 得到了广泛应用。CCD 的几何精度高, 像素间距小, 如果配置适当的光学系统, 就可以获得很高的分辨率。结构光视觉方法的研究最早出现于 20 世纪 70 年代。为了得到产品某一方面的特征信息, 在 CCD 的图像传感技术上结合结构光来得到可以更加明确的图像信息, 一定意义上改进了成像质量。

文中设计了一套基于 CCD 以及结构光的机器视觉测量系统, 通过提取经 CCD 成像后图像的清晰边缘, 对测量结果进行拟合, 以获得被测物边缘的准确信息; 同时通过概率论知识使用数据处理的手段来进行误差修正, 从而提高了测量精度。其中相机的标定技术是整个系统研究的理论基础和核心内容。

收稿日期: 2011-03-01

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2009CDB313); 湖北省教育厅项目(Q20091404)

作者简介: 钟飞(1970—), 男, 武汉人, 硕士, 湖北工业大学副教授, 主要研究方向为包装过程检测与控制。

1 CCD 工作原理

机器视觉中,相机标定常用的相机模型有:针孔模型、正交投影模型及拟透视投影模型^[2]。其中针孔模型是最常用的相机模型,在大多数场合下可以满足要求。针孔成像模型见图 1,其中: X_c - Y_c - Z_c 为相机坐标系; X - Y 为物理坐标系。

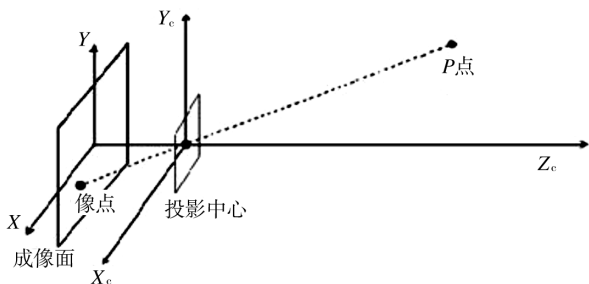


图 1 CCD 相机的针孔模型

Fig. 1 Pin-hole model of CCD camera

图中:像点坐标为 $\begin{pmatrix} X \\ Y \\ -f \end{pmatrix}$; 投影中心坐标为 $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$;

P 点坐标为 $\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix}$ 。

由于像点投影中心和 P 点在同一条直线上,根据几何关系有:

$$k \left\{ \begin{bmatrix} X \\ Y \\ -f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}, \text{展开得:}$$

$$\begin{cases} k = \frac{z-f}{f} = \frac{z_c}{f} \\ X = -\frac{x_c}{k} = f \frac{x_c}{z} \\ Y = -\frac{y_c}{k} = f \frac{y_c}{z} \end{cases}$$

由公式可以看出像点与物体点之间是一个非线性的关系,将以上公式用齐次坐标表示:

$$w \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix}$$

于是,可得相机的线性针孔模型(其中 (u_0, v_0) 为

像面中心):

$$w \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dX} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dY} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \vec{R} \\ \vec{t} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{R} \\ \vec{t} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

2 方案设计及实验结果分析

根据现有的机器视觉理论,详细分析了 CCD 对图像的采集理论,优化设计了整个测量系统的关键参数,测量系统见图 2。激光器与 CCD 相机成一定角度

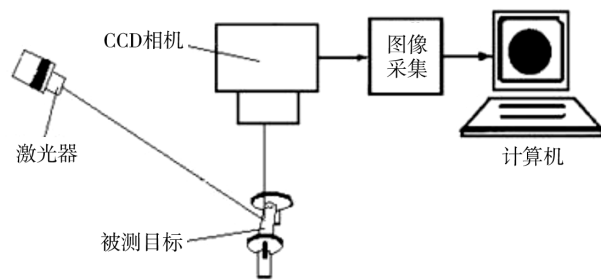


图 2 CCD 相机测量系统

Fig. 2 Measuring system based on CCD camera

放置,角度根据现场测量条件而定,相机接收到带有被测目标特征信息的图像,经由图像采集卡送给计算机^[3]。为了研究其误差精度,使用了相机标定的简化模型,使得运算过程较之针孔模型更加简便,并且更加切合实际测量过程。

2.1 实验数据

测量步骤如下:将光刻尺与标定板间隔放置,将相机与光源固定在平台相对位置上,开机调整相机参数以及各测量部件间的几何参数,在成像最清晰时开始测量;分别在物距为 390,392,394,396,398 mm,以此类推直到 410 mm 处各取一张测量图,依次标号保存;打开机器视觉软件 hexsight,分别测取各物距下

各间隔所占像素差值^[4];对数据进行整理,为后续数据处理做准备。实际测量过程中标定样件见图 3。

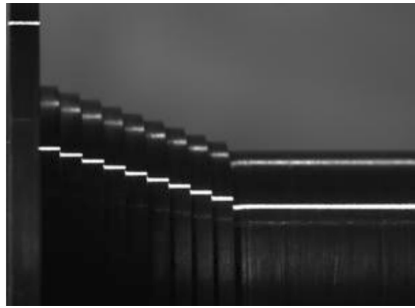


图 3 标定样件
Fig. 3 Calibration sample

2.2 测量误差分析

CCD 上感光组件的表面具有储存电荷的能力,并以矩阵的方式排列。当其表面感受到光线时,会将电荷反应在组件上,整个 CCD 上的所有感光组件所

产生的信号,就构成了一个完整的画面^[5]。然而,图像之间会存在不均匀性,造成这种不均匀性的因素十分复杂,常规算法一般无法将所有因素都考虑到,影响了其校正效果。实验根据 CCD 的不均匀性,判断其产生根源,提出比较有效的标定方案。像素差值经过 hexsight 测量得到,可得的原始数据见表 1(其中物距及测量尺寸单位为 mm)。

由公式 $l = kp$ 得到各间距之间的测量均值为:

$$\bar{L} = \frac{1}{n}(l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i$$

用测量值减去平均值可得残余误差 v_i (见表 2),用 v_i 可以计算出标准偏差 σ ,而标准偏差 σ 为评定随机误差 δ 的尺度。由公式:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}}$$

可得各测量结果的残余误差见表 2。

表 1 在不同物距下测得的各尺寸像素差值(像素)
Tab. 1 Measurements of pixel value of different size under different object distance

间距	物距/mm							
	70~75	70~80	70~85	70~90	70~95	70~100	70~105	70~110
390	148.132	295.046	443.151	591.594	740.01	888.217	1 036.308	1 184.307
392	147.477	294.068	441.484	589.191	737.016	884.554	1 031.887	1 179.094
394	146.607	292.851	439.392	586.564	733.389	880.585	1 027.157	1 173.938
396	146.132	291.548	437.721	583.952	730.224	876.557	1 022.71	1 168.778
398	145.536	290.173	435.629	581.217	726.847	872.523	1 018.249	1 163.679
400	145.116	288.739	433.627	578.557	723.532	868.649	1 013.869	1 158.196
402	144.192	287.725	431.888	576.363	721.08	865.257	1 009.49	1 153.507
404	143.723	286.285	430.02	573.805	717.655	861.45	1 004.803	1 148.36
406	143.146	284.982	428.296	571.144	714.427	857.616	1 000.541	1 143.651
408	142.594	283.923	426.49	568.888	711.312	853.841	996.435	1 138.719
410	141.716	283.007	425.072	566.466	708.464	850.354	992.023	1 133.714

表 2 各测量结果的残余误差(mm)
Tab. 2 Residual error of measurement results

间距	物距							
	70~75	70~80	70~85	70~90	70~95	70~100	70~105	70~110
390	-0.001 76	-0.012 01	-0.014 88	-0.007 9	-0.005 82	-0.009 03	-0.010 57	-0.010 85
392	-0.000 99	0.000 614	-0.002 65	0.002 392	0.007 454	0.004 552	0.000 262	-0.003 92
394	-0.007 63	0.005 058	-0.005 02	0.004 857	-0.001 1	0.007 397	0.000 17	0.004 469
396	-0.002 49	0.003 166	0.001 878	0.000 993	-0.002 48	-0.002 06	-0.002 24	-0.000 95
398	-0.000 31	0.001 119	-0.002 15	-0.002 45	-0.005 3	-0.004 77	0.003 053	0.005 076
400	0.006 454	-0.006 03	-0.007 66	-0.009 43	-0.013 63	-0.011 12	0.000 523	-0.014 33
402	-0.002 53	0.004 753	0.001 02	0.006 542	0.016 485	0.009 452	0.009 946	0.007 324
404	0.003 315	-0.001 19	0.002 345	0.006 038	0.008 01	0.009 853	0.001 848	0.005 354
406	0.003 452	-0.006 3	0.002 837	-0.005 94	-0.003 46	-0.002 49	-0.005 19	0.002 986
408	0.005 705	-0.000 41	0.004 145	0.001 166	-0.004 89	-0.005 46	0.001 844	0.002 622
410	-0.003 23	0.011 226	0.020 136	0.003 741	0.004 708	0.003 646	0.000 353	0.002 227

由残余误差观察法,得到上表所得到的误差包含系统误差和随机误差,由于:

$$\delta_i = l_i - L = (l_i - \bar{L}) + (\bar{L} - L) = v_i + \Delta L$$

可以由 $\Delta L = \bar{L} - L$ 来分析系统误差,从而得到误差值并对结果进行补偿,得到最终的测量结果见表 3。

表 3 最终测量结果(mm)

Tab.3 Final measurements

间距	测量真值	测量均值	系统误差	标准偏差	极限偏差
70~75	4.997 5	5.013 054 324	0.015 55	0.001 288	0.003 863
70~80	9.99 5	9.993 404 614	-0.001 595	0.001 925	0.005 776
70~85	15.000 5	15.006 66	0.006 16	0.002 625	0.007 875
70~90	20.00 6	20.021 5	0.015 5	0.001 699	0.005 097
70~95	25.005 5	25.040 33	0.034 83	0.002 531	0.007 593
70~100	30.005 0	30.057 37	0.052 37	0.002 223	0.006 669
70~105	35.001 5	35.068 83	0.067 33	0.001 535	0.004 605
70~110	39.998 0	40.075 9	0.077 9	0.002 106	0.006 318

由表 3 可知,测量系统可达到的精度为 0.01 mm。

实验的误差一方面来自于实验点的抽取,用标定板测量其横纵坐标时将产生了一定的测量误差;当从计算机图像提取对应实验点像素坐标值时,由于噪声干扰或者光照条件不好等因素造成投影点不清楚,手动挪动鼠标提取投影点像素值也存在误差,误差一般在 2~3 个像素左右^[6]。另一方面来自于测量系统和计算方法。测量系统误差包括由于 CCD 摄像机模型简化和其像片存在的各种几何畸变所引起的误差^[7],此外还包括摄像机安装角度引起的误差:当摄像机安装角度发生变化,其主光轴随之旋转,引起投影点偏移,造成误差,且角度越大,误差越大。此外,还有计算方法上的误差^[8]。

3 结论

通过绕线实验检测该 CCD 视觉测量架的测量精度,经理论分析与实验证明:在一定物距下,如 70 mm 时,相机的分辨率为 0.061 73。一般通过误差修正,用机器视觉来对线圈绕线质量进行监控的方案,在一般的生产环境下可以达到 0.01 mm 的测量精度,系统的可靠性、稳定性更高,可以实现对生产线产品的

自动、快速以及非接触测量,因此具有广泛的使用价值。

参考文献:

- [1] 姜玉秋. 基于双曲线的计算机视觉的管口尺寸测量[J]. 吉林大学学报, 2009, 27(2): 150-155.
- [2] 田原 媛. CCD 摄像机标定的研究[J]. 微计算机信息, 2008(27): 206-207.
- [3] 赵清杰, 钱芳, 蔡利栋. 计算机视觉[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 张志勇, 王琼, 蒲亮, 等. 一种是实用 CCD 相机标定方法[J]. 红外与激光工程, 2006(s4): 408-415.
- [5] 王和昌, 陈次昌, 王淮公. CCD 测量误差的研究[J]. 光学技术, 2009, 35(3): 402-405.
- [6] 郭涛, 陈伟, 严新平, 等. 单片式 CCD 彩色摄像机颜色处理原理与实现[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 31(3): 488-490.
- [7] 宋华丽, 余旭初, 陈菊雷, 等. 变焦相机标定在无人飞行器中的应用[J]. 测绘工程, 2010, 19(1): 71-74.
- [8] 王栋, 潘卫军, 李涛. 帧转移面阵 CCD 电子像移补偿设计[J]. 航天返回和遥感, 2009, 30(3): 42-49.