

文章编号 1004-924X(2013)10-2480-08

嵌入式线结构光角度视觉检测及误差补偿

裘祖荣, 陈浩玉*, 胡文川, 邹茂虎, 杨 婷

(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:建立了基于 DM642 的嵌入式线结构光角度视觉检测系统, 用于精确实时地在线检测线结构光角度。首先, 将以 CCD 为图像传感器的装置与基准平面固定, 以线结构激光发生器为光源的装置与被测平面固定; 用 CCD 采集投影屏上的线结构光图像, 再由 DM642 进行实时处理得到线结构光的角位置, 并对角位置进行标定来获得被测平面与基准平面的夹角。然后, 分析系统误差源, 得出系统主要误差是由 CCD 感光面阵平面与投影屏平面之间的夹角 α 所致。最后, 针对此误差项建立数学模型, 并根据模型采用圆光栅控制激光发生器精确转动 3 个角位移, 由圆光栅所得的精确角位移值和对应的图像检测值计算出标定夹角 α 的大小和方向, 并对由此夹角误差导致的检测误差进行精确补偿。实验结果表明: 在 α 为 $0.331\ 97^\circ$ 时, 经误差补偿后的圆光栅角位移值和对应的图像检测值之间的转角误差由 22.522% 减小到 0.595%, 系统测量的不确定度为 $0.051\ 44^\circ$ 。

关键词: 角度检测; 机器视觉; 线结构光; 误差补偿; DM642

中图分类号: TB922; TP242.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132110.2480

Embedded angle vision inspection and error compensation for line structured lights

QIU Zu-rong, CHEN Hao-yu*, HU Wen-chuan, ZOU Mao-hu, YANG Ting

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

* Corresponding author, E-mail: chenhaoyu_2004@126.com

Abstract: An embedded angle visual inspection system for line structured light was established based on DM642 to detect the angle of the line structured light in real-time accurately. Firstly, a device using the CCD as its image sensor was fixed on a datum plane, and the other one using a line structured laser as its light source was fixed on the plane to be measured. The image of the line structure laser on a screen was acquired by the CCD and its angular position value was obtained by on-line processing of DM642. The angle between the datum plane and the measured plane could be gotten through calibration of the angular position value. Then, the angle α between CCD surface and projection screen surface was proved to be the dominant error source by an error analysis. For compensating the error, a mathematical model was established. On the basis of the model, a calibration method was used as follows: the circular grating was used to control the laser generator to rotate accurately three angular displacements, and the angle value of α and its direction were calculated.

收稿日期: 2013-03-21; 修订日期: 2013-05-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50775160)

ed according to the angular displacement value and the corresponding image detection, then the detection error brought by the angle could be compensated. The experimental results show that the angle error is reduced to 0.595% from 22.522% after compensation when α is 0.33197° and the measuring uncertainty of the system is 0.05144° .

Key words: angle detection; machine vision; line structured light; error compensation; DM642

1 引言

视觉检测是非接触式测量的一个重要分支,涉及现代光学、机械设计制造、图像处理等多个领域。该技术自起步发展至今,随着其功能的完善,应用范围也在不断扩大。近年来,在精密机床加工^[1]、水下在线远程目标跟踪^[2]、内燃机缸体缺陷检测^[3]、车辆仪表监测^[4]、红外图像实时处理^[5]等领域,视觉检测技术的应用和发展非常迅速。同时,随着嵌入式技术和图像处理技术的快速进步,视觉检测技术趋向于向微型化和实时化方向发展。

系统标定是保证视觉检测测量精度的关键。文献[6]对多 CCD 线结构光测量系统进行了研究,提出了一种基于液晶平面靶标的精确快速多 CCD 全局标定方法;文献[7]主要针对鱼眼镜头的畸变进行了全方位的视觉参数标定。上述两种方法都使用平面靶标标定全局误差,其标定精度会受视场大小和靶标精度的影响而较低。文献[8]针对大型工件全尺寸测量的问题,提出并实现了一种基于立体视觉技术的便携式测量系统。文献[9]提出了一种由单摄像机-投影器构成两个单目测量单元的测量方法,避免了局部高光和自身遮挡,保证了点云数据的完整性;但采用点云匹配的方法进行云数据的采集和处理,数据量大,实时处理性能较差。上述视觉检测研究主要集中在长度和位置坐标测量上,对角度测量的研究还不够充分。文献[10]针对集成电路引线键合问题,提出了面向芯片封装的视觉精确定位技术,但是转角的定位精度只有 0.1° 。文献[11-12]针对大尺寸空间角度,提出了一种通过检测公共基准与各待测元素的夹角,间接获得待测元素异面夹角的现场标定方法,解决了大尺寸空间角度测量的公共基准问题,但因为系统对外界环境光线干扰较敏感,该方法的抗干扰能力不强。

以上研究涉及的领域广、方法多,但都对直接影响系统测量准确性的图像传感器几何角度误

差进行深入分析,因此,本文提出了一种嵌入式线结构光角度视觉检测方法,并针对其几何角度误差提出了一种新的标定方法,通过消除此项误差大大提高了系统的检测准确度。该检测系统使用 DM642 作为核心芯片,实现了在线实时数据处理,脱离了 PC 机的限制,可在恶劣的工程现场环境中使用,具有测量灵活,抗环境光干扰,通用性强等优点。

2 测量原理

本视觉检测系统的测量原理如图 1 所示。将线结构激光发生器装置固定放置在被测平面上,将以 CCD 为图像传感器的图像采集装置放置在基准平面上;由线结构激光发生器产生的线结构光投射在图像采集装置的投影屏外侧,CCD 从投影屏内侧采集线结构光在投影屏上的投影图像。通过 DM642 对采集到的图像数据进行处理,可得到线结构光在采集图像中的角度。将测得的不同角度值作差可得到线结构光的角位移值。

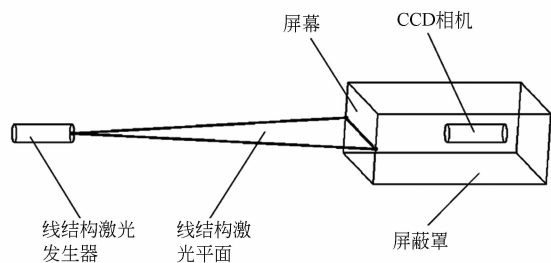


图 1 测量系统原理图

Fig. 1 Principle of measuring system for line structured lights

3 硬件设计

实时图像采集处理系统以 TMS320DM642 为核心处理器,由视频解码 TVP5150 模块、视频编码 SAA7121H 模块、图像处理器 DM642 模块、存储器扩展模块、电源管理模块、JTAG 接口模块组成。

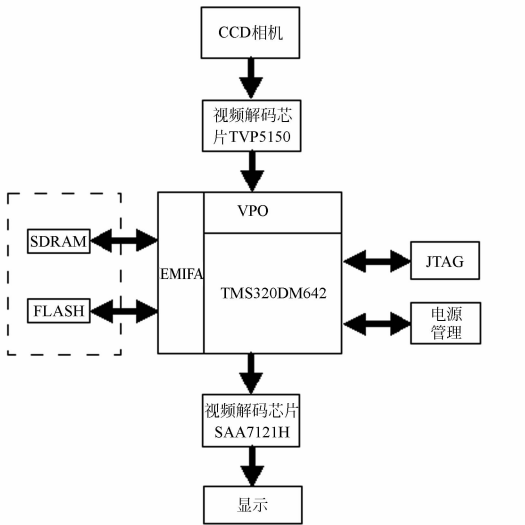


图 2 硬件结构框图

Fig. 2 Framework of hardware system

如图 2 所示,DM642 通过 I2C 总线控制视频解码芯片 TVP 5150 将采集到的模拟图像信号进行数字转换,输出 BT. 656 格式的数字信号 (YUV4 : 2 : 2),输出的数字信号数据进入 DM642 视频输入口的 FIFO 缓存,通过 EMIFA 将图像数据存放在 SDRAM 中;程序通过 JTAG 下载到 DM642 的外扩 FLASH,由 DM642 对数字图像信号进行分析处理。其中,SDRAM 存储图像,FLASH 存储程序和重要数据,它们都通过外部存储器接口 EMIFA 与 DM642 连接;处理后的数据经视频编码芯片 SAA7121H 编码,并由显示器显示。

4 软件设计

线结构光角度视觉检测系统的软件设计调试在 TMS320C6000 集成开发环境 CCS3. 3 中进行,软件流程如图 3 所示。图像预处理主要是图像去噪。由于投影屏幕为光学镀膜玻璃,只有激光能明显成像,所以采集到的图像背景单一,与激光光束图像反差较大,因此图像去噪主要针对光束边缘。图 4 为预处理前后的图像对比,可明显看出图像预处理对图像边缘的降噪效果较好,可分离出部分较尖锐的杂点,减小较为扁平的凸起。

为了减少运算量,本文在检测图像边缘时采用了先粗定基准直线,并以此为基准来判断图像的有效扫描区域的方法^[13]。该方法大大缩小了

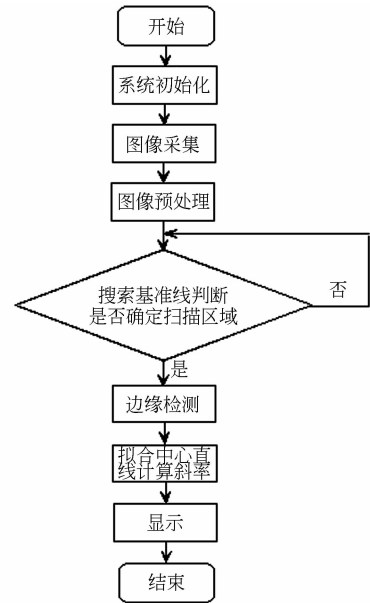


图 3 软件流程图

Fig. 3 Framework of software system



(a) 预处理前

(a) Before pre-processing



(b) 预处理后

(b) After pre-processing

图 4 图像预处理效果图

Fig. 4 Pictures of image pre-processing

图像的处理区域,有效减少了光束边缘检测的运算量;并能滤除杂点以及抑制屏幕缺陷导致的光束边缘粗大凸起对最终斜率计算结果的影响,结果如图 5 所示。

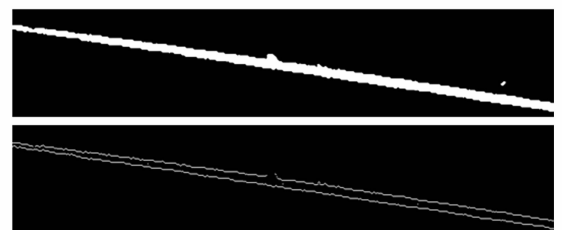


图 5 图像边缘检测效果图

Fig. 5 Pictures of edge detection

5 误差分析及补偿

激光发生器的安装误差会导致其自身中心轴线与回转中心轴线产生偏移误差和倾斜误差^[14-15]。若激光发生器安装在一固定装置上并由此装置驱动旋转,则通过简单的几何关系可知,在此固定装置的回转中心轴线与投影屏垂直的情况下,这两项安装误差对角度测量结果均无影响。但由于 CCD 具有结构误差和安装误差;所以其感光面阵平面与投影屏平面很难保持平行,并且 CCD 采集到的图像会出现投影畸变。

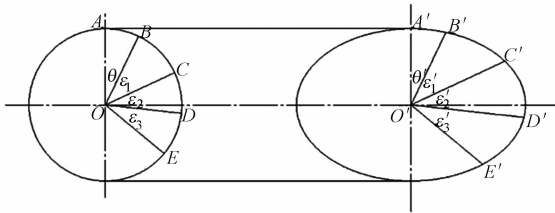


图 6 投影包络示意图

Fig. 6 Picture of edge detection

为了计算激光光束在投影屏上的真实转角,建立如图 6 所示的投影模型。圆表示线结构激光发生器沿其回转中心轴线回转一圈,激光光束在投影屏上的图像所包络的单位区域;椭圆 O' 表示 CCD 感光面阵平面相对于投影屏沿 O'A' 轴方向有转角 α 时,圆 O 在 CCD 上的投影椭圆。由于圆上转角与其投影椭圆上对应的投影转角不等,导致了投影屏上的激光光束转角与其在 CCD 上的采集图像转角不相等。

定义椭圆 O' 的长轴长度为单位长度 1,则椭圆短轴和圆 O 的半径则为 $\cos \alpha$ 。 $\angle AOB = \theta$ 表示投影屏上激光光束初始位置与旋转轴线 OA 的夹角, $\angle BOC = \epsilon_1$ 、 $\angle COD = \epsilon_2$ 、 $\angle DOE = \epsilon_3$ 表示激光光束在投影屏上的转动角度; $\angle A'O'B = \theta'$ 表示旋转轴线 O'A' 与 CCD 上的激光光束投影所在起始位置的夹角,显然 $\theta \neq \theta'$; $\angle B'O'C' = \epsilon'_1$ 、 $\angle C'O'D' = \epsilon'_2$ 、 $\angle D'O'E' = \epsilon'_3$ 表示 CCD 采集到的激光光束旋转角度测量值。定义 CCD 采集并计算得到的光束与图像 x 轴的夹角为 γ' ,对应被测平面与基准平面的夹角为 φ 。

当线结构激光发生器依次转动 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 角度时,投影屏上的投影光束角度相应地转动 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$,从 CCD 上采集得到的角度转动值分别为 $\epsilon'_1, \epsilon'_2, \epsilon'_3$ 。显然,根据投影定理,圆 O 上 3 个旋转角度的比值与椭圆 O' 上对应的 3 个扇形区域的面积之比相等,但却与椭圆 O' 上对应的 3 个旋转角度的比值不等,即:

$$\begin{cases} \epsilon_1 : \epsilon_2 : \epsilon_3 = S_{B'O'C'} : S_{C'O'D'} : S_{D'O'E'} \\ \epsilon_1 : \epsilon_2 : \epsilon_3 \neq \epsilon'_1 : \epsilon'_2 : \epsilon'_3 \end{cases} \quad (1)$$

由于 CCD 与投影屏的倾斜角 α 的大小和方向都是随机的,也就是说 α 和 θ' 都是未知的,所以需要计算求出 α 和 θ' 。根据以上条件,求解两个未知数,需要两个方程和 3 个转角值,列方程组如下:

$$\begin{cases} \frac{S_{B'O'C'}}{S_{B'O'E'}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3} \\ \frac{S_{B'O'D'}}{S_{B'O'E'}} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3} \end{cases}, \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} S_{B'O'C'} = \frac{1}{2} \int_{\theta'}^{\theta'+\epsilon'_1} R^2(X, \alpha) dX \\ S_{B'O'D'} = \frac{1}{2} \int_{\theta'}^{\theta'+\epsilon'_1+\epsilon'_2} R^2(X, \alpha) dX \\ S_{B'O'E'} = \frac{1}{2} \int_{\theta'}^{\theta'+\epsilon'_1+\epsilon'_2+\epsilon'_3} R^2(X, \alpha) dX \end{cases}, \quad (3)$$

$$R^2(X, \alpha) = \cos^2 x + \cos^2 \alpha \times \sin^2 X. \quad (4)$$

由式(3)、(4)计算得:

$$\begin{cases} S_{B'O'C'} = (1 + \cos^2 \alpha) \frac{\epsilon'_1}{4} + \frac{\sin^2 \alpha}{8} \times [\sin 2(\theta' + \epsilon'_1) - \sin 2\theta'] \\ S_{B'O'D'} = (1 + \cos^2 \alpha) \frac{\epsilon'_1 + \epsilon'_2}{4} + \frac{\sin^2 \alpha}{8} \times [\sin 2(\theta' + \epsilon'_1 + \epsilon'_2) - \sin 2\theta'] \\ S_{B'O'E'} = (1 + \cos^2 \alpha) \frac{\epsilon'_1 + \epsilon'_2 + \epsilon'_3}{4} + \frac{\sin^2 \alpha}{8} \times [\sin 2(\theta' + \epsilon'_1 + \epsilon'_2 + \epsilon'_3) - \sin 2\theta'] \end{cases}. \quad (5)$$

将式(5)带入式(2)中可得 θ' 和 α 的确定解:

$$\begin{cases} \theta' = \frac{\lambda_1 \beta_1 - \lambda_2 \beta_3}{\lambda_2 \beta_1 - \lambda_1 \beta_2} \\ \alpha = \tan^{-1} \sqrt{\frac{4\lambda_1}{\beta_1 \sin 2\theta' + \beta_3 \cos 2\theta' - 2\lambda_1}} \end{cases}. \quad (6)$$

其中:

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_1 &= \varepsilon_1(\varepsilon_2' + \varepsilon_3') - \varepsilon_1'(\varepsilon_2 + \varepsilon_3) \\ \lambda_2 &= (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)(\varepsilon_2' + \varepsilon_3') - \varepsilon_3'\varepsilon_3 \\ \beta_1 &= (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)\cos(2\varepsilon_1') - \\ &\quad \varepsilon_1\cos 2[(\varepsilon_1' + \varepsilon_2' + \varepsilon_3') - (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)] \\ \beta_2 &= (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)\cos(2\varepsilon_1') - \\ &\quad (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\cos 2[(\varepsilon_1' + \varepsilon_2' + \varepsilon_3') - \varepsilon_3] \\ \beta_3 &= (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)\sin(2\varepsilon_1') - \varepsilon_1\sin 2(\varepsilon_1' + \varepsilon_2' + \varepsilon_3') \\ \beta_4 &= (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)\sin(2\varepsilon_1') - \\ &\quad (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\sin 2(\varepsilon_1' + \varepsilon_2' + \varepsilon_3') \end{aligned} \right. \quad (7)$$

由式(6)、(7)可知,当 $\varepsilon_1 = \varepsilon_1'$ 、 $\varepsilon_2 = \varepsilon_2'$ 、 $\varepsilon_3 = \varepsilon_3'$ 时, $\alpha = 0^\circ$ 。由此说明,当投影屏与 CCD 感光面阵

$$k = \frac{2(\gamma' - \gamma_0')(1 + \cos^2 \alpha) + \sin^2 \alpha [\sin 2(\theta' + \gamma' - \gamma_0') - \sin 2\theta']}{2(1 + \cos^2 \alpha)\varepsilon_1 + \sin^2 \alpha [\sin 2(\theta' + \varepsilon_1) - \sin 2\theta']}$$

当 γ_0' 为激光发生器固定装置与图像采集装置在同一个基准平面上的测量所得时,将激光发生器固定装置同样放置在新的被测平面上,此被测平面与基准平面之间的夹角 φ 即为激光光束在投影屏上的真实转角:

$$\varphi = \varepsilon \quad (9)$$

可见,当 $\alpha = 0^\circ$ 时, $\varphi = \gamma' - \gamma_0'$, 不存在角度误差。

6 实 验

为了验证本角度检测系统及其误差补偿方法的正确性,设计实验如图 7 所示。



图 7 角度检测及误差标定试验装置图

Fig. 7 Device for angle detection and error calibration

将线结构激光发生器安装在由伺服电机驱动和 RENISHAW 圆光栅精确控制其转角的精密

所在的平面平行时,投影屏上激光光束的真实转动角度与 CCD 上采集到的转动角度保持一致,不存在投影误差。当投影屏与 CCD 感光面阵不平行时,由公式(6)可精确计算出 CCD 相对于投影屏的偏转角度 α ,并计算出转动轴 $O'A'$ 的角位置,即转动轴 $O'A'$ 与 CCD 采集图像 x 轴的夹角为 $\gamma_0' - \theta'$ 。其中, γ_0' 为初始角位置处 CCD 采集到的激光光束与图像 x 轴的夹角。

激光光束在投影屏上的真实转角 ε 可用下式精确求出:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \times k \quad (8)$$

其中:

转台的回转中心,构成激光发射端角度控制装置。其中,RENISHAW 圆光栅配合细分盒和读数头,读数精度达到 $\pm 2.23''$,可精确选择所需旋转角度。选用 KOWA 公司的 KA-1881 型 CCD,有效使用像素为 720×576 ;为了减少 CCD 镜头引起的畸变,采用日本 Myutron 公司的 Megapixel_CCTV 系列 FV2520 型号镜头,其畸变率为 -0.01% 。CCD 和电路板都固定安装在屏蔽罩内,与其底部支撑一起构成图像采集装置。用屏蔽罩将 CCD 与外界光线隔离,只通过前方喷涂有漫反射涂料的光学镀膜投影屏来采集激光光束图像。

将激光发射端角度控制装置与图像采集装置固定放置在同一基准平面上,此时测量得到的起始角度 γ_0' 为 0,它代表激光发射端角度控制装置所放置的平面与图像采集装置所放置的平面间的夹角,即有 $\varphi_0 = 0^\circ$ 。

为了得到不同的转角,用激光发射端角度控制装置将激光发生器精确旋转 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 3 个转角,其值直接由圆光栅读数头读出;从 CCD 采集到的光束图像数据经 DM642 处理得到的旋转角度为 $\varepsilon_1', \varepsilon_2', \varepsilon_3'$ 。根据以上数据,由式(6)、(7)可计算出 α 和 θ' ,即完成了 CCD 安装误差的标定,将结果带入式(8)、(9)进行误差补偿。

根据上述实验方法,将 CCD 采集线结构激光光束图像,数据处理得到的角度转动值与圆光栅直接得到的角度转动值进行了实验对比。

6.1 测量重复性实验

为了验证系统数据处理的稳定性,将激光光

束旋转至固定位置并保持不动,进行 20 次等条件重复数据采集处理,得出激光光束的均值为 $-9.950\ 15^\circ$,标准差为 $0.003\ 41^\circ$,极差为 $0.013\ 17^\circ$ 。

6.2 检测精度实验

表 1 为 $\alpha=0.331\ 97^\circ$ 时的测量数据。由表可知,误差补偿后,转角误差由 22.522% 下降到 0.595%,基本消除了由 CCD 感光面阵平面与投影屏平面之间的夹角 α 导致的转角误差。

表 1 误差补偿前后转角测量结果对比

Tab.1 Comparison of rotate angle results

实验次数	光栅转角	测量值		误差	
		α 误差	α 误差	α 误差	α 误差
		补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
1		0.828 18	0.675 37	0.149 57	-0.003 24
2		0.834 96	0.672 95	0.156 35	-0.005 66
3		0.830 72	0.673 81	0.152 11	-0.004 8
4		0.835 14	0.675 54	0.156 53	-0.003 07
5	0.67 861	0.828 98	0.674 66	0.150 37	-0.003 95
6		0.831 79	0.670 97	0.153 18	-0.007 64
7		0.828 97	0.677 14	0.150 36	-0.001 47
8		0.832 72	0.676 14	0.154 11	-0.002 47
9		0.830 63	0.677 64	0.152 02	-0.000 97
10		0.832 45	0.671 56	0.153 84	-0.007 05
均值	0.678 61	0.831 45	0.674 57	0.154 284	-0.004 04

标定完成后,用一套简单的激光发生器固定装置替代激光发射端角度控制装置,只需将此套激光发生器固定装置与图像采集装置放在同一平面上,调整其采集值至 γ_0' ;再将此激光发生器固定装置放在被测平面上,将标定结果带入式(8)中即可精确计算出激光光束在投影屏上的真实转角 ϵ ,由式(9)可以得出被测平面与基准平面之间的夹角 φ 。

7 系统测量不确定度分析

7.1 系统对采集到的光束图像的检测计算不确定度

投影屏上光束与图像 x 轴夹角 γ' 的 25 次测量的标准差为 $\sigma_\gamma=0.003\ 41^\circ$,则角度检测重复性引起的不确定度 $u_\gamma = \left| \frac{\partial \varphi}{\partial \gamma} \right| \sigma_\gamma \approx 0.000\ 000\ 17^\circ$,其

自由度 $\nu_\gamma=25-1=24$ 。

对投影屏上光束的 4 个角位置依次求差得到 3 个转角 $\epsilon_1'=0.091\ 35^\circ, \epsilon_2'=0.415\ 56^\circ, \epsilon_3'=0.339\ 17^\circ$ 。由于每次测量等精度且独立,由夹角 γ' 的不确定度 μ_γ 经计算可得夹角 $\epsilon_1', \epsilon_2', \epsilon_3'$ 的检测不确定度为:

$$\begin{cases} u_{\epsilon_1'} = \left| \frac{\partial \varphi}{\partial \epsilon_1'} \right| \sqrt{2\sigma_\gamma^2} \approx 0.000\ 99^\circ \\ u_{\epsilon_2'} = \left| \frac{\partial \varphi}{\partial \epsilon_2'} \right| \sqrt{2\sigma_\gamma^2} \approx 0.000\ 12^\circ \\ u_{\epsilon_3'} = \left| \frac{\partial \varphi}{\partial \epsilon_3'} \right| \sqrt{2\sigma_\gamma^2} \approx 0.000\ 12^\circ \end{cases}$$

自由度 $\nu_{\epsilon_1'}=\nu_{\epsilon_2'}=\nu_{\epsilon_3'}=25-1=24$ 。

7.2 圆光栅旋转角度检测不确定度

已知圆光栅系统角度测量的误差范围为 $\Delta = \pm 0.000\ 62^\circ$,取均匀分布,得到圆光栅系统角度检测误差的标准不确定度:

$$u_\Delta = \frac{0.000\ 62^\circ}{\sqrt{3}} = 0.000\ 36^\circ$$

圆光栅的 4 个角位置依次做差得到圆光栅 3 个转角 $\epsilon_1=0.071\ 67^\circ, \epsilon_2=0.332\ 82^\circ, \epsilon_3=0.274\ 12^\circ$,由于每次测量等精度且独立,检测不确定度为:

$$\begin{cases} u_{\epsilon_1} = \left| \frac{\partial \varphi}{\partial \epsilon_1} \right| u_\Delta = 0.000\ 09^\circ \\ u_{\epsilon_2} = \left| \frac{\partial \varphi}{\partial \epsilon_2} \right| u_\Delta = 0.000\ 01^\circ \\ u_{\epsilon_3} = \left| \frac{\partial \varphi}{\partial \epsilon_3} \right| u_\Delta = 0.000\ 01^\circ \end{cases}$$

采用标准不确定度的 B 类评定,取相对标准

差 $\frac{\sigma_{u_{\epsilon_1}}}{u_{\epsilon_1}} = \frac{\sigma_{u_{\epsilon_2}}}{u_{\epsilon_2}} = \frac{\sigma_{u_{\epsilon_3}}}{u_{\epsilon_3}} = 35\%$,相应的自由度为:

$$\nu_{\epsilon_1} = \nu_{\epsilon_2} = \nu_{\epsilon_3} = \frac{1}{2 \times (0.35)^2} = 4$$

7.3 CCD 角度检测不确定度

$$u_{\text{CCD}} = 0.29 \times \arctan\left(\frac{1}{720}\right) = 0.023^\circ$$

同样采用标准不确定度的 B 类评定,取相对标准差 35%,其自由度 $\nu_{\text{CCD}}=4$ 。

7.4 不确定度合成

由于 $u_\gamma, u_{\epsilon_1'}, u_{\epsilon_2'}, u_{\epsilon_3'}, u_{\epsilon_1}, u_{\epsilon_2}, u_{\epsilon_3}, u_{\text{CCD}}$ 相互独立,将这些不确定度分量合成得:

$$u = \sqrt{u_\gamma^2 + \sum_{i=1}^3 u_{\epsilon_i'}^2 + \sum_{i=1}^3 u_{\epsilon_i}^2 + 5 \times u_{\text{CCD}}^2} \approx 0.051\ 44^\circ$$

系统的自由度为:

$$\nu = \frac{u^4}{\frac{u_{\gamma'}^4}{\nu_{\gamma'}} + \sum_{i=1}^3 \frac{u_{\varepsilon_1'}^4}{\nu_{\varepsilon_1'}} + \sum_{i=1}^3 \frac{u_{\varepsilon_1}^4}{\nu_{\varepsilon_1}} + 5 \times \frac{u_{\text{CCD}}^4}{\nu_{\text{CCD}}} } \approx 20.$$

最终不确定度的计算结果为:

$$\varphi = -9.950^\circ, u = 0.05144^\circ, \nu = 20.$$

由此可知,系统的不确定度较小,且主要取决于 CCD 的像素数量,增加 CCD 的像素数量可降低系统的不确定度。

8 结 论

本文在以 TMS320DM642 为核心处理器的硬件平台基础上设计了一套嵌入式线结构光角度

视觉检测系统。通过误差分析得出 CCD 感光面阵平面与投影屏平面的安装角度误差为主要误差源;运用圆上扇角角度之比与其投影椭圆上对应扇形区域的面积之比相等的原理,使用圆光栅控制激光发生器精确转动 3 个已知转角,并用 CCD 在投影屏上采集 3 个对应的转角值,通过建模分析完成误差标定;使用便携式简易激光发射端进行测量,并利用标定结果对角度检测结果进行了误差补偿,在 CCD 感光面阵平面与投影屏平面之间的夹角 α 为 0.33197° 时,转角误差由 22.522% 减小到 0.595%。最后通过不确定度分析可知,系统的测量不确定度为 0.05144° ;且对其影响最大的因素是 CCD 的像素大小,可通过增大 CCD 像素数量来降低系统检测的不确定度。

参考文献:

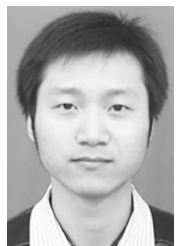
- [1] ZHANG X, TSANG W M, YAMAZAKI K, *et al.*. A study on automatic on-machine inspection system for 3D modeling and measurement of cutting tools [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2013, 24(1):71-86.
- [2] DREWS P JR, KUHN V, GOMES S. Tracking system for underwater inspection using computer vision [C]. *Proceedings of the 2012 International Conference on Offshore and Marine Technology: Science and Innovation (NAVTEC 2012)*, 2012: 27-30.
- [3] KANNA S K R, MANIGANDAN M S. Intelligent vision inspection system for IC engine head: An ANN approach [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 479-481(3):2242-2245.
- [4] CUI A, ZHANG CH, HE D P, *et al.*. Research on device and method of vision inspection of a vehicle dashboard framework [C]. *Proceedings of IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI '2011)*, 2011:150-154.
- [5] YANG H M, HUANG ZH H, SUN L B, *et al.*. A study on designing infrared video real-time processing system based on TMS320DM642 [C]. *2010 6th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, 2010:1-4.
- [6] 贾倩倩,王伯雄,赵博华,等.基于液晶靶标的多 CCD 线结构光测量系统全局标定[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12):2990-2996.
- [7] JIA Q Q, WHANG B X, ZHAO B H, *et al.*. Global calibration of multi-CCD line-structured-light measurement system based on LCD target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12):2990-2996. (in Chinese)
- [8] 冯为嘉,张宝峰,曹作良.基于鱼镜头的全方位视觉参数标定与畸变矫正[J]. *天津大学学报*, 2011, 18(1):126-134.
- [9] FENG W J, ZHANG B F, CAO Z L. Omni-directional vision parameter calibration and rectification based on fish-eye lens [J]. *Journal of Tianjin University Science and Technology*, 2011, 18(1): 126-134. (in Chinese)
- [10] 刘建伟,梁晋,梁新合,等.大尺寸工业视觉测量系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1):126-134.
- [11] LIU J W, LIANG J, LIANG X H, *et al.*. In-situ calibration method for large-scale space angle optical measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):126-134. (in Chinese)
- [12] 石春琴,张丽艳,韦虎,等.随机模式投影双目测量系统中的单目测量[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 257-265.
- [13] SHI CH Q, ZHANG L Y, WEI H, *et al.*. Monocular measurement in binocular measurement system with instantaneous random illumination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 257-265. (in Chinese)
- [14] 李君兰,刘士为,张大卫.面向芯片引线键合的视

- 觉精确定位方法[J]. 天津大学学报, 2012, 45(5): 405-410.
- LI J L, LIU S W, ZHANG D W. High-precision vision localization method for IC wire bonding [J]. *Journal of Tianjin University Science and Technology*, 2012, 45(5): 405-410. (in Chinese)
- [11] 胡文川, 裘祖荣, 张国雄. 大尺寸空间异面直线夹角激光检测[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1427-1433.
- HU W CH, QIU Z R, ZHANG G X. Measurement of large-scale space angle formed by non-uniplanar lines [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1427-1433. (in Chinese)
- [12] 胡文川, 裘祖荣, 张国雄. 大尺寸空间角度检测系统的现场标定方法[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 175-182.
- HU W CH, QIU Z R, ZHANG G X. In-situ calibration method for large-scale space angle optical measurement system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(10): 175-182. (in Chinese)
- [13] 刘延杰, 赖日飞, 荣伟彬, 等. 基于改进随机 Hough 变换的快速中心检测方法[J]. 纳米技术与精密工程, 2011, 9(4): 298-304.
- LIU Y J, NAI R F, RONG W B, *et al.*. A fast center detecting method based on improved randomized hough transform [J]. *Nano Technology and Precision Engineering*, 2011, 9(4): 298-304. (in Chinese)
- [14] 王文, 林铿, 高贯斌, 等. 关节臂式坐标测量机角度传感器偏心参数辨识[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 135-141.
- WANG W, LIN K, GAO G B, *et al.*. Eccentricity parameter identification of angle sensors for articulated arm CMMs [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 135-141. (in Chinese)
- [15] 艾晨光, 褚明, 孙汉旭, 等. 基准圆光栅偏心检测及测角误差补偿[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2479-2484.
- AI CH G, ZHU M, SUN H X, *et al.*. Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2479-2484. (in Chinese)

作者简介:



裘祖荣(1958—),男,上海人,教授,博士生导师,1981年、1995年于太原工业大学分别获得学士、硕士学位,2000年于天津大学获得博士学位,主要从事精密机械设计、精密仪器设计、传感器等方面的教学和科研工作。E-mail: qzr@tj. edu. cn



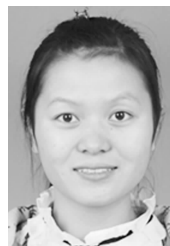
陈浩玉(1983—),男,四川邛崃人,硕士研究生,2007年于河北工业大学获得学士学位,主要从事精密测试及智能仪器方面的研究。E-mail: chenhaoyu_2004@126. com



胡文川(1983—),男,天津人,博士,2006年于河北工业大学获得学士学位,2008年、2013年于天津大学分别获得硕士、博士学位,主要从事精密测试及智能仪器方面的研究。E-mail: hwm921@yahoo. com. cn



邹茂虎(1988—),男,江西乐平人,硕士研究生,2011年于长春理工大学获得学士学位,主要从事几何量测量与精密仪器方面的研究。E-mail: zoumaohu_0709@126. com



杨婷(1988—),女,江西萍乡人,硕士研究生,2011年于华北电力大学获得学士学位,主要从事精密测试及智能仪器方面的研究。E-mail: 377157556@qq. com