



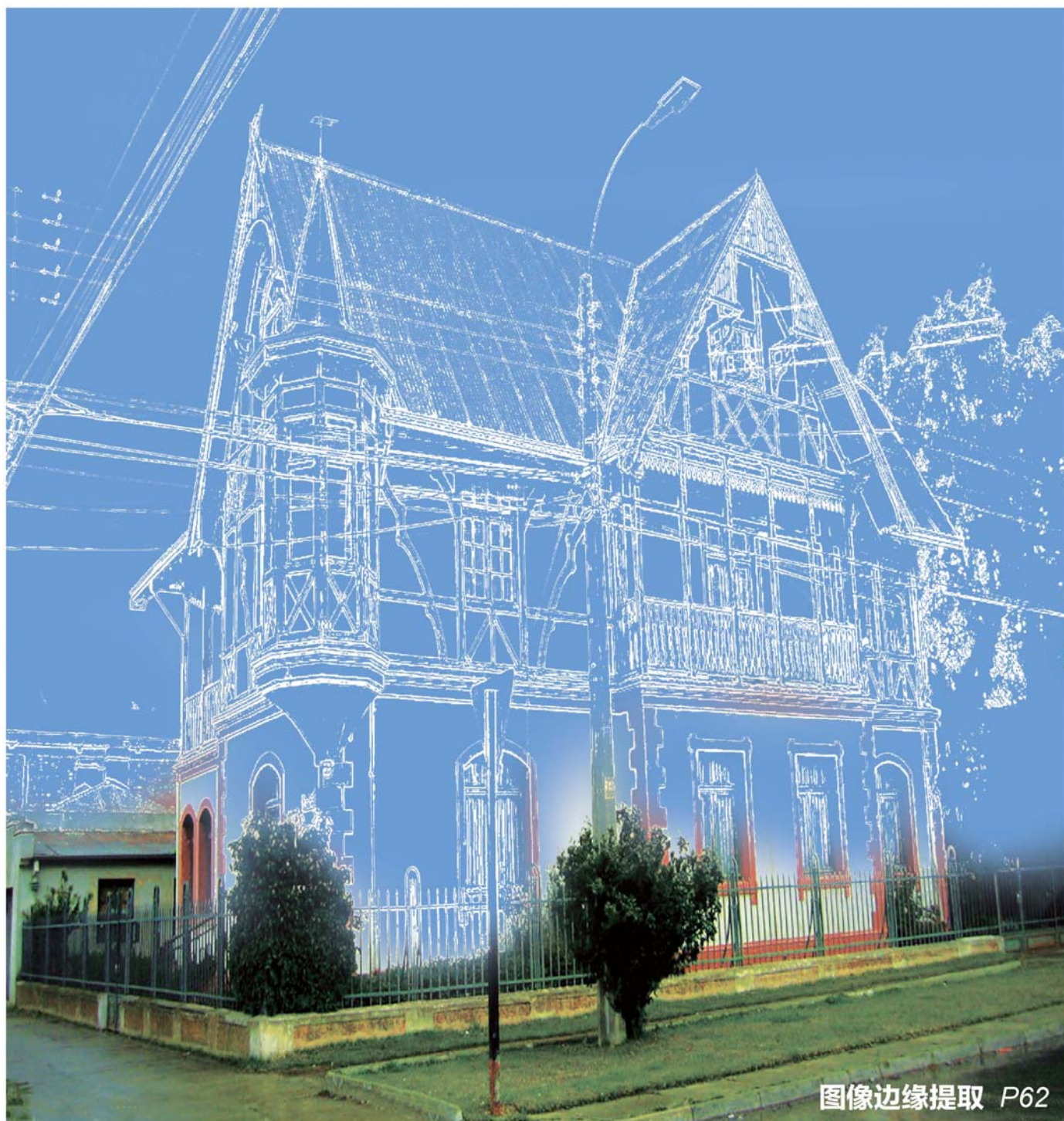
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2014
01
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



图像边缘提取 P62



第19卷第1期（总第213期）

2014年1月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

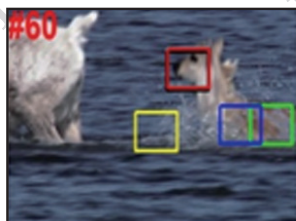
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

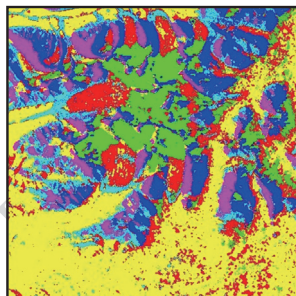
国内定价 50.00元



基于 L_2 范数最小化的实时目标跟踪(第36页)



数字地球渲染中单精度浮点数误差改正(第119页)



全极化合成孔径雷达影像地形纠正及其在雪冰制图中的应用(第150页)

图像处理和编码

图像阈值化的自适应粗糙熵方法

吴涛 0001

利用局部极值点特性的多聚焦图像快速融合

杨达, 王孝通, 徐冠雷, 吴俊波 0011

摄像机位姿的高精度快速求解

李书杰, 刘晓平 0020

整数变换实现大容量图像无损信息隐藏

邱应强 0028

图像分析和识别

基于 L_2 范数最小化的实时目标跟踪

齐美彬, 杨勋, 杨艳芳, 陆磊, 蒋建国 0036

利用七宫格的遮挡车辆凹性检测与分割

刘万军, 陈虹宇, 姚雪, 曲海成 0045

基于体素的人手结构自动估测

姚争为, 潘志庚 0054

结合高斯加权距离图的图像边缘提取

贾迪, 孟祥福, 孟琰, 董娜, 方金凤 0062

基于标定的任意半径柱面上2维条形码畸变校正

王伟, 何卫平, 郭改放, 牛晋波, 曹西征 0069

面向惯性约束聚变实验靶图像的快速椭圆检测

吴倩, 邹伟, 徐德, 张峰 0076

融合MBP和EPMOD的人脸识别

闫海婷, 王玲, 李昆明, 刘机福 0085

遮挡目标的分片跟踪处理

张彦超, 许宏丽 0092

图像理解和计算机视觉

多尺度分析的运动注意力计算

刘龙, 樊波阳 0101

多尺度空间判别性概率潜在语义分析的场景分类

季海峰, 高隽, 郑鹏, 王婧 0109

计算机图形学

数字地球渲染中单精度浮点数误差改正

李尚林, 郑利平, 张静, 杨柳青 0119

医学图像处理

小波与双边滤波的医学超声图像去噪

张聚, 王陈, 程芸 0126

Contourlet变换系数加权的医学图像融合

张鑫, 陈伟斌 0133

遥感图像处理

滑坡高分辨率遥感多维解译方法及其应用

鲁学军, 史振春, 尚伟涛, 周和颐 0141

全极化合成孔径雷达影像地形纠正及其在雪冰制图中的应用

符思涛, 李震, 田帮森 0150

结合邻域相关影像与最大相关性最小冗余性特征选择的面向对象变化检测

邹利东, 潘耀忠, 朱文泉, 周公器, 李宜展 0158

CONTENTS

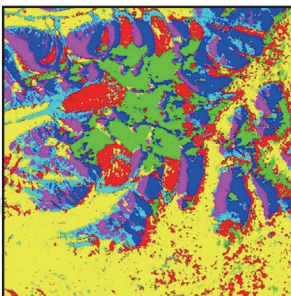
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Real-time object tracking based on L_2 -norm minimization(P36)



Correction method of single-precision floating-point error for digital Earth rendering(P119)



Topographic correction of polarimetric synthetic aperture radar and its application in snow and ice mapping(P150)

Image Processing and Coding

- Adaptive rough entropy method for image thresholding
Wu Tao 0001
- Multi-focus image fusion based on properties of local extrema
Yang Da, Wang Xiaotong, Xu Guanlei, Wu Junbo 0011
- An accurate and fast algorithm for camera pose estimation
Li Shujie, Liu Xiaoping 0020
- Large capacity lossless information hiding in images using integer transform
Qiu Yingqiang 0028

Image Analysis and Recognition

- Real-time object tracking based on L_2 -norm minimization
Qi Meibin, Yang Xun, Yang Yanfang, Lu Lei, Jiang Jianguo 0036
- Detection and segmentation of occluded vehicles based on seven grids
Liu Wanjun, Chen Hongyu, Yao Xue, Qu Haicheng 0045
- Automatic calibration of hand structures based on voxel data
Yao Zhengwei, Pan Zhigeng 0054
- Image edge extraction combined with a Gaussian weighted distance graph
Jia Di, Meng Xiangfu, Meng Lu, Dong Na, Fang Jinfeng 0062
- Restoration of distorted 2D barcode marked on arbitrary radius cylinder based on calibrated camera
Wang Wei, He Weiping, Guo Gaifang, Niu Jinbo, Cao Xizheng 0069
- Fast ellipse detection for target images in ICF experiment
Wu Qian, Zou Wei, Xu De, Zhang Feng 0076
- Face recognition by fusing MBP and EPMOD
Yan Haiting, Wang Ling, Li Kunming, Liu Jifu 0085
- Fragments tracking under occluded target
Zhang Yanchao, Xu Hongli 0092

Image Understanding and Computer Vision

- Multi-scale analysis based motion attention computation
Liu Long, Fan Boyang 0101
- Scene classification based on multi-scale spatial discriminative probabilistic latent semantic analysis
Ji Haifeng, Gao Jun, Zheng Peng, Wang Jing 0109

Computer Graphics

- Correction method of single-precision floating-point error for digital Earth rendering
Li Shanglin, Zheng Liping, Zhang Jing, Yang Liuqing 0119

Medical Image Processing

- Despeckling for medical ultrasound images based on wavelet and bilateral filter
Zhang Ju, Wang Chen, Cheng Yun 0126
- Medical image fusion based on weighted Contourlet transformation coefficients
Zhang Xin, Chen Weibin 0133

Remote Sensing Image Processing

- The method and application of multi-dimension interpretation for landslides using high resolution remote sensing image
Lu Xuejun, Shi Zhenchun, Shang Weitao, Zhou Heyi 0141
- Topographic correction of polarimetric synthetic aperture radar and its application in snow and ice mapping
Fu Sitao, Li Zhen, Tian Bangsen 0150
- The object-oriented change detection based on neighborhood correlation images and the minimum-redundancy-maximum-relevance feature selection
Zou Lidong, Pan Yaozhong, Zhu Wenquan, Zhou Gongqi, Li Yizhan 0158

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)01-0069-07

论文引用格式: 王伟,何卫平,郭改放,牛晋波,曹西征. 基于标定的任意半径柱面上 2 维条形码畸变校正[J]. 中国图象图形学报,2014,19(1):69-75. [DOI:10.11834/jig.20140109]

基于标定的任意半径柱面上 2 维条形码畸变校正

王伟, 何卫平, 郭改放, 牛晋波, 曹西征

西北工业大学 现代设计与集成制造重点实验室, 西安 710072

摘要: **目的** 2 维条形码在直接零件标识技术中应用越来越广泛,但对于标刻在柱形零件上的 2 维条形码,存在扭曲形变的问题。严重的扭曲形变将会改变 2 维条形码的本原模式,造成识读失效或困难,因此需要进行畸变校正以恢复其本原模式。该内容属于目标复原的主题范畴。**方法** 为了校正这种畸变,首先分析了柱面 2 维条形码的畸变形成原理,然后基于标定的机器视觉装置与透视投影原理建立柱面上 2 维条形码畸变校正模型,最后在图像信息中推导出拟合椭圆与柱形零件的对应关系,通过拟合椭圆估计出柱形零件半径参数信息,并代入畸变校正模型得到最终的校正结果。**结果** 实验选取两幅标刻在不同半径且采用不同视角获取的具有严重扭曲形变的 2 维条形码图像,根据预先标定好的机器视觉系统与该算法进行校正,实验结果表明,该方法能够有效地校正自由半径柱面上 2 维条形码的扭曲畸变,且算法时间控制在 1 s 之内。**结论** 当前大多数已知文献仅研究标刻在平面上 2 维条形码的识别,而该方法扩展了 2 维条形码的应用范围,即不仅可以作为平面产品的标识,也可以作为柱面产品的标识。当然,根据本文提供的思路,可以将 2 维条形码的标识面范围扩展到任意已知曲面。

关键词: 柱面零件;扭曲畸变 2 维条形码;参数标定;自由半径估计;扭曲畸变校正

Restoration of distorted 2D barcode marked on arbitrary radius cylinder based on calibrated camera

Wang Wei, He Weiping, Guo Gaifang, Niu Jinbo, Cao Xizheng

Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education,
 Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract: **Objective** In the field of direct part marking technology, 2D barcode is more and more widely used, but there is a problem that 2D barcodes marked on a cylindrical part have spatial distortions which will result in reading difficulties. Existing algorithms mostly attempt to recognize 2D barcode marked on the plane which only have perspective and incline distortion. However, they can hardly recognize 2D barcode marked on cylindrical part because the pattern of 2D barcode is changed by spatial distortion. For correcting this difficulty, a new method should be proposed to recovery the distorted 2D barcode, and the radius parameter of cylindrical part should be automatically got without manual measurement. **Method** We firstly analyze the principle of forming distorted 2D barcode marked on cylindrical parts, and we establish a spatially distorted 2D barcode correction model based on calibrated machine vision mechanism and the principle of perspective projection. then deduces the relationship between fitted ellipse and the radius of cylindrical part in the image, in addition, estimates the radius by the ellipse parameters. finally substitutes it into the correction model to get the corrected 2D barcode. In the experiment, we select two distorted 2D barcodes marked on the cylindrical parts with different radius parameter, and acquires pictures of them from different views. It gets fixed parameters of the machine vision device, based on that the spatial-

收稿日期:2013-04-23;修回日期:2013-06-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51275419);西北工业大学研究生创业种子基金项目(Z2012035)

第一作者简介:王伟(1984—),男,西北工业大学机电学院航空宇航科学与技术专业博士研究生,主要研究方向为工业标识,机器视觉等。E-mail:879322584@qq.com

ly distorted 2D barcode correction model could be established. **Result** The experiment results show that, the two distorted 2D barcodes are recovered well and the processing time is limited in 1 second. Compared with previous methods, this algorithm is more concise because of prior calibration and spatial distortion mode. Besides, this algorithm is more automated because the radius parameter could be automatically got by the image. **Conclusion** Based on camera calibration, the method is effective for correcting spatially distorted 2D barcode marked on arbitrary radius cylinder. The method extends the application range of 2D barcode that not only flat part but also cylindrical part could also be identified. However, in the future work it should introduce nonlinear distortion of the lens and get the more accurate camera calibration parameters for more ideal restoration result.

Key words: cylindrical part; spatially distorted 2D barcode; spatial distortion; parameter calibration; spatial distortion correction

0 引言

直接零件标识 DPM (direct part marking) 技术是一种可直接在产品或零件的表面形成包括文字、符号或图案等形式的永久标识技术。由于 2 维条形码相对于其他标识符号具有编码容量大、密度高、纠错能力强,所以多选用 2 维条形码作为产品的永久标识^[1-2]。随着 2 维条形码应用范围越来越广,目前关于 2 维条形码识别的算法也层出不穷。但现有方法大都是对基于平面上的 2 维条形码进行处理,因此条形码图形区域仅存在刚性形变或者透视形变^[3]。由于 2 维条形码在设计之初本身具有探测图形或定位模块用于限定物理尺寸、定位和符号失真^[4],因此只需检测出探测图形即可识别 2 维条形码。但如果条形码标刻面为非平面的,则条形码区域会存在扭曲形变,此种情况下图像区域中直线特性不再保持,仅通过探测图形无法有效校正 2 维条形码。如图 1 所示为自然条件下柱面上具有扭曲形变的 2 维条形码示例图。实际应用中,柱形产品上标刻 2 维条形码情况最为常见,因此,本文主要讨论并验证柱形零件上 2 维条形码扭曲形变的校正。

目前对于柱面上 2 维条形码畸变校正研究文献

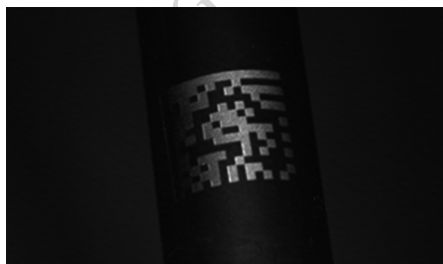


图 1 柱面上扭曲 2 维条形码示例图

Fig. 1 Demonstration figure of distorted two-dimensional on the cylinder

较少。对于目标扭曲形变类问题,最常见的方法是多项式拟合^[5],虽然理论上任何变换都可由多项式的泰勒展开式表示,但高阶多项式插值中常出现不稳定的现象;Chu 等人^[6]采用样本点的方式简化识别柱面变形的 2 维条形码,虽然算法简单易实现,但本质上并没有校正扭曲形变,并且样本点易受噪声干扰而出现识别错误;李夏霜等人^[7]分析了刀具柱面 DM 码的形成原理与过程,利用透视投影建立了柱面 DM 码的畸变模型,但仅仅进行了畸变仿真,并没有提出有效的畸变校正方案。

与本文研究内容相似的且被广泛研究的问题为积厚文档扫描图像校正,对于此类问题可总结为基于模型的方法和基于图像的方法。典型的方法为向世明等人^[8]采用图像信息与几何变形相结合的技术,首先提取文本的中心线作为参考曲线,然后利用 Kanungo 模型来描述文本的几何变形,通过中心线信息近似计算 3 个参数:焦长度、圆柱截面的圆弧半径和弧角,最后将标记点变换至原有水平位置从而达到校正目的,此方法不仅能够校正字符行的弯曲,同时能够校正字符的空间扭曲。但此方法待估参数过多,并且大量用到近似计算,因此校正精度较低。

与文档读取的动态扫描线成像方式相比,由于条形码识读设备成像方式一般为固定视角,因此畸变因素将会更加复杂(存在近大远小的透视因素)。但受积厚文档扫描图像校正方法的启发,并在分析其现有方法优缺点的基础上,提出了基于相机标定的空间几何信息与图像信息相结合的柱面 2 维条形码扭曲畸变校正方法。首先根据配套装置及标定获得机器视觉的相关固定参数,然后分析 2 维条形码在柱面上畸变产生的原理,并提出逆向校正的思路与方法。由于实际应用中柱面零件千差万别,因此柱面半径参数无法进行标

定,因此通过分析柱面2维条形码边缘的透视投影,建立柱面半径参数的估计函数,从而从图像信息中就可得到零件的柱面半径参数。最后通过实验验证了本文算法的合理性。

1 装置与参数标定

在前期的工作中,作者对于标刻在柱面零件上的DM码识读有一定的基础,设计了柱面2维条形码识读装置与算法^[9-10],刀具识读装置示意图如图2所示。在此装置中,相机位置及其焦距固定,并且始终垂直于刀具定位装置平面,同时相机与定位装置平面的垂直距离固定。将含有2维条形码的刀具柱面一侧放在定位装置上,调节夹板获得能够完全摄取条形码图像的最佳视野。本文忽略摄像机光学系统在制造和安装过程中产生的各种非线性畸变,因此可采用线性针孔成像模型描述成像过程。用坐标系表示的成像示意图如图3所示。其中 O 点表示相机光心,与 x 、 y 及相机光轴 z 轴组成的直角坐标系称为相机坐标系。 XO_1Y 表示图像坐标系,垂直距离 OO_1 等于相机焦距。世界坐标系 Z_w 轴与 z 轴位于同一直线, X_w 过柱形零件的轴心,由装置的设计可知 X_w 平行于 x 轴,并与 Z_w 轴的交点 O_w 表示为世界坐标系原点,过 O_w 轴做 Y_w 轴平行于 y 轴。由于2维条形码大小不一,所以需要调节夹板宽度以拍摄到完整的条形码区域, D_1D_2 为可调夹板之间的距离,也即为所拍摄的刀具柱面有效视野宽度。 D 点为 D_1D_2 与 Z_w 轴的交点, OD 表示光心与定位装置之间距离,为定值。

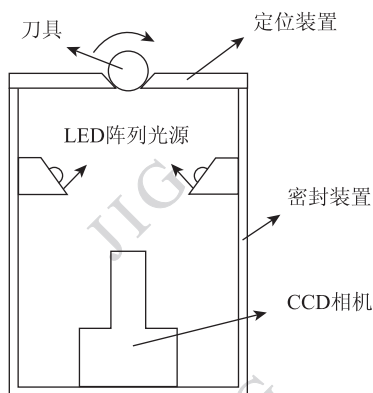


图2 刀具上2维条形码识读装置示意图

Fig. 2 The schematic diagram of two-dimensional bar code reading device on the cutters

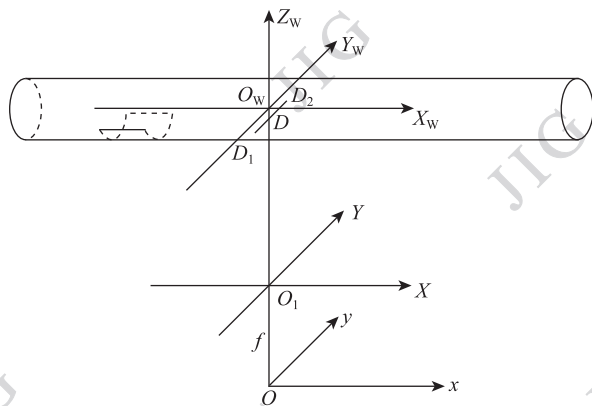


图3 成像坐标系示意图

Fig. 3 The schematic diagram of imaging coordinate system

2 标定下的柱面2维条形码畸变校正

2.1 参数分类及相互关系

根据第1节中的标定,可将相关参数分为定量参数和变量参数两类。

定义1 本模型中标定的定量为焦距 $f=OO_1$,定位装置物距 $d=OD$ 。

定义2 本模型中变量为有效视野宽度 $2l=D_1D_2$,柱形零件半径 r ,世界坐标系原点 O_w 在相机坐标系中的 z 轴坐标 $z=OO_w$,条形码区域的横向范围设为 (X_1, X_2) 。

其中在夹板边缘设置定位白边,通过识别白边可获得有效视野宽度 $2l$ 。利用文献[10]的方法,根据2维码区域为边缘丰富区域,通过投影法可获得条形码区域的横向范围 (X_1, X_2) 。根据勾股定理很容易得到 $DO_w = \sqrt{r^2 - l^2}$,因此 $OO_w = d + \sqrt{r^2 - l^2}$ 。

2.2 畸变模型建立及校正

在实际的工业应用中,2维条形码大都是平行投影标刻在零件表面作为标识。则码区投影切面方程为

$$Z_w = -r \quad (1)$$

$$X_1 \leq X_w \leq X_2, -l \leq Y_w \leq l$$

投影在柱面上的空间曲面方程为

$$Y_w^2 + Z_w^2 = r^2 \quad (2)$$

$$X_1 \leq X_w \leq X_2, -l \leq Y_w \leq l, Z_w < 0$$

为方便分析,取柱面上码区的一个截面的透视模型,如图4所示,圆弧 MN 与投影切面上的线段 $M'N'$ 相映射,对应点在 $X_wO_wY_w$ 平面的投影坐标相等。

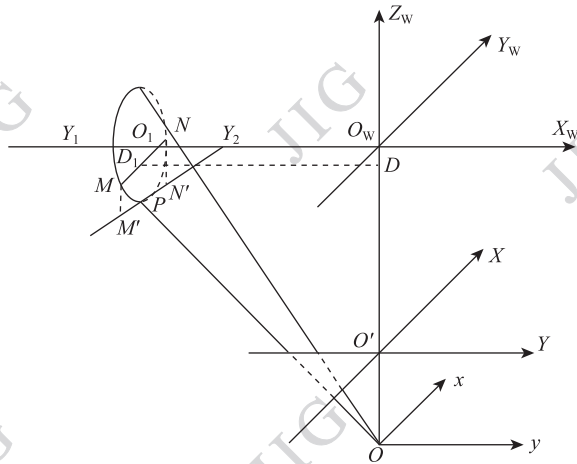


图4 柱面码区截面的透视模型示意图

Fig. 4 Perspective model of the bar code of section on cylinder

校正的过程等价于将柱面点在图像坐标系 $XO'Y$ 上的投影校正至对应切面上的点在 $XO'Y$ 上的投影。取柱面上码区范围内的一点 (X_w, Y_w, Z_w) , 则与投影坐标 (u, v) 的关系可由以下齐次方程变换得

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ -\sqrt{r^2 - X_w^2} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, M_1 是相机内部参数矩阵

$$M_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{dX} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dY} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, (u_0, v_0) 为图像坐标系中的原点位置, 本文取为图像中心, dX, dY 表示一个像素在 X 轴和 Y 轴方向上的物理尺寸。

M_2 是相机外部参数矩阵, 由相机相对于世界坐标系的方位决定, 在本文中只有一个 z 轴方向的平移分量, 因此 M_2 为

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d + \sqrt{r^2 - l^2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

可得到投影矩阵

$$M = \begin{bmatrix} \frac{f}{dX} & 0 & u_0 & du_0 + u_0 \sqrt{r^2 - l^2} \\ 0 & \frac{f}{dY} & v_0 & dv_0 + v_0 \sqrt{r^2 - l^2} \\ 0 & 0 & 1 & d + \sqrt{r^2 - l^2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

同样, 与 (X_w, Y_w, Z_w) 对应的投影切面上点 (X_w, Y_w, Z'_w) 与投影坐标 (u', v') 的关系为

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ -r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由此, 2 维条形码在柱面上的区域及其对应切面上的区域在图像中的全部投影坐标便可求解出, 重置图像灰度值 $f(u', v') = f(u, v)$, 便可得到校正后的无扭曲畸变的 2 维条形码。

3 柱形零件半径参数估计

由上节可得到在投影矩阵 M 中, 只有柱形零件半径 r 是未知的, 如果每次校正之前手工测量, 不仅影响零件的识别效率, 也会引入测量误差, 从而致使 2 维条形码的校正效果大打折扣。因此本文提出了基于图像信息估计柱形零件半径 r 的方法。

3.1 参数模型关系建立

理论上从 3 维空间到 2 维平面投影是一个信息丢失的过程, 无法逆向求取深度信息。但由于柱形零件上的 2 维条形码为平行投影方式标刻, 因此可得出其投影的某种规律。如图 5 所示为柱形零件一个截面圆 $O_1, O_1 \in (X_1, X_2)$ 与成像的透视投影关系模型。

根据透视投影变换所固有的特性, 椭圆或圆在

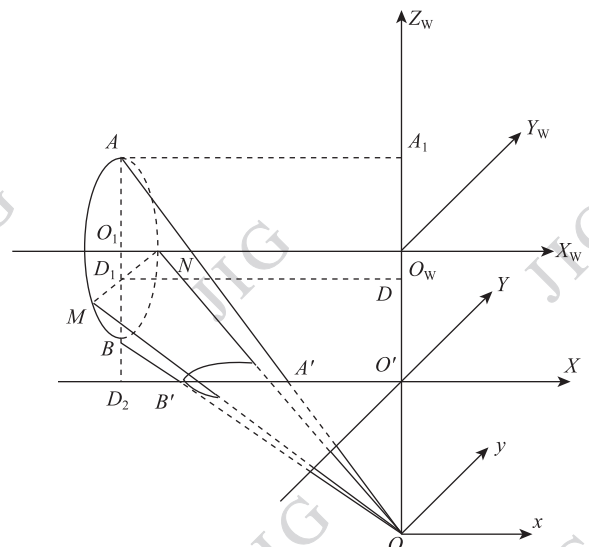


图5 截面圆成像的透视投影关系模型

Fig. 5 The relation model of perspective projection of circular section imaging

相机平面上所成的像一般仍为椭圆。Zhang 等人基于透视投影变换和空间解析几何理论,建立了透视投影变换下空间椭圆在图像平面上的成像规律^[11],但模型过于复杂,且需要很多先验参数。本文证明出在本装置标定下简单有效的成像规律,并推导出与半径 r 函数关系。

由于圆 O_1 关于面 xOz 对称,不难证明其在图像坐标系 XO_1Y 中的投影关于 X 轴对称。因此圆 O_1 上下顶点连成的直径 AB 对应的投影线段 $A'B'$ 在 X 轴上,并且 $A'B'$ 为投影椭圆的对称轴,即 $A'B'$ 为长轴或短轴,下面将简要证明 $A'B'$ 为短轴。

证明:设 x_1 为截面圆心所在 X_w 轴位置,则齐次向量, $\vec{O_w A} = [x_1, 0, r, 1]^T$, $\vec{O_w B} = [x_1, 0, -r, 1]^T$, 设 $d_1 = d + \sqrt{r^2 - l^2}$, 由投影矩阵可得在图像平面的长度为

$$|\vec{A'B'}| = |M \cdot \vec{O_w A} - M \cdot \vec{O_w B}| = \frac{2x_1 r \alpha_x}{d_1^2 - r^2} \quad (8)$$

齐次向量 $\vec{O_w M} = [x_1, y, \sqrt{r^2 - y^2}, 1]^T$, $\vec{O_w N} = [x_1, -y, -\sqrt{r^2 - y^2}, 1]^T$, 式中 M, N 为截面圆上两点且关于直径 AB 对称, $y \in [0, r]$ 。由投影矩阵可得 MN 在图像平面的长度为

$$|\vec{M'N'}| = |M \cdot \vec{O_w M} - M \cdot \vec{O_w N}| = \frac{2d_1 y \alpha_y}{d_1^2 + y^2 - r^2} = g(y) \quad (9)$$

$|\vec{M'N'}|$ 为一关于 y 的函数,使得 $\frac{\partial g(y)}{\partial y} = 0$, 可得

$$|\vec{M'N'}|_{\max} = g(y)_{\max} = \frac{2fr\alpha_y}{\sqrt{d_1^2 - r^2}} \quad (10)$$

显然等于投影椭圆的另一对称轴长度。比较二者的大小,即

$$\frac{|\vec{M'N'}|_{\max}}{|\vec{A'B'}|} = \frac{f\sqrt{d^2 + 2\sqrt{r^2 - l^2} - l^2}}{x_1 + \varepsilon} > 1 \quad (11)$$

式(11)中为了使得方程不呈现出病态,所以分母加上一个较小值 ε 。在本文所基于的标定装置中, f 要远远大于条形码距中心移动距离 x_1 , 因此式(11)比值通常大于1, 即 $|\vec{A'B'}|$ 为短轴,大量的实验结果也验证了该结论。证明完毕。

下面将建立半径 r 与相关参数的关系式,如图5所示,设 M, N 为截面圆与夹板的交点,因此 $MN =$

$2l$; B' 为 X 轴与圆弧 $\widehat{MN}$ 投影的交点,由图像很容易得到 $O'B'$ 的长度,设 $O'B' = m$; 由之前的标定已知 $OO' = f$, $OD = d$ 。在图像中做辅助线 $AA_1 // O_w X_w$, 延长 AB 交 X 轴于 D_2 。

容易求得 $BD_2 = d + \sqrt{r^2 - l^2} - f - r$ 。由 $\frac{BD_2}{f} =$

$$\frac{B'D_2}{m} \Rightarrow B'D_2 = \frac{BD_2 \cdot m}{f} \Rightarrow O'D_2 = m + \frac{BD_2 \cdot m}{f}$$

$$\frac{O'A'}{O'D_2} = \frac{O'A'}{AA_1} = \frac{OO'}{OA_1} \Rightarrow O'A' = \frac{m(d + \sqrt{r^2 - l^2} - r)}{d + \sqrt{r^2 - l^2} + r}$$

设短轴长为 b , 则

$$2b = A'B' = O'B' - O'A' = \frac{2mr}{d + \sqrt{r^2 - l^2} + r}$$

得 $b = \frac{mr}{d + \sqrt{r^2 - l^2} + r}$ 。求解完毕。

3.2 半径 r 估计方法

圆弧 $\widehat{MN}$ 中的2维条形码目标点在图像平面上投影出一条曲线(有可能是间断的), 设为 $\widehat{M'N'}$ 。由上文分析可知该曲线为椭圆的一部分, 魏振忠等提出了利用边缘目标点进行拟合椭圆的方法^[12]。

椭圆的图像曲线的一般表达式为

$$f(\mathbf{a}, \mathbf{x}) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (12)$$

由于本文所投影的椭圆不存在旋转因素, 因此上式中 $b = 0$ 。所以, $\mathbf{a} = [a \ c \ d \ e \ f]$, $\mathbf{x} = [x^2 \ y^2 \ x \ y \ 1]$ 。

引入 $|\mathbf{a}|^2 = 1$, 建立目标函数

$$F(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^N f(\mathbf{a}, \mathbf{x}_i)^2 + M(|\mathbf{a}|^2 - 1)^2 \quad (13)$$

式中, M 为惩罚因子。于是椭圆的拟合转化成极小化 $F(\mathbf{a})$, 即非线性最小二乘问题。这是一个外罚函数法无约束优化问题, 可以利用牛顿—高斯法等求解出 $\mathbf{a}$, 因此可求得椭圆的两条轴长

$$m = \sqrt{\frac{d^2}{4a^4} + \frac{e^2}{4a^2c^2} - \frac{f}{a^2}}$$

$$n = \sqrt{\frac{d^2}{4a^2c^2} + \frac{e^2}{4c^4} - \frac{f}{c^2}}$$

由3.1节证明出 $A'B'$ 为短轴长度, 因此将两条轴中较短的赋值给 b 依据半径 r 与相关参数的关系式, 可求得半径 r 的大小。为了确保 r 的准确性, 利用同种方法求得2维条形码区域的多个截面圆在图像中的投影, 估算出半径 r 的大小, 并求平均值作为最终参数半径 r 的估计值。然后代入投影矩阵 M ,

可将扭曲变形的 2 维条形码区域进行校正。

4 实验结果

基于柱面 2 维条形码识读装置参数如表 1 所示。

表 1 柱面 2 维条形码识读装置参数配置
Table1 Parameter configuration of cylindrical two-dimensional bar code read device

相机焦距 f/mm	物距 d/mm	图像中心 坐标 (u_0, v_0)	图像尺寸 /pixel	视野 /mm
30 × 28	30	10	(320, 240)	640 × 480

在柱面 2 维条形码识读装置上采集不同半径上的多幅 2 维条形码图像,然后根据本文设计的算法

进行校正,得到了显著的校正结果。

实例 1 横向有效视野宽度 $2l = 16\text{ mm}$, 2 维条形码的实际大小为 $13\text{ mm} \times 13\text{ mm}$, 输入图像已经经过条形码粗定位裁切。首先经过二值化算法将 2 维条形码图像进行二值化处理,如图 6(b)所示。然后提取 2 维条形码的边缘,并对横向弯曲边缘进行椭圆拟合,如图 6(c)所示。根据短轴估计柱形零件半径 r ,得到的平均值为 9.7 mm ,实际应为 10 mm 。最后将所估计的半径 $r = 9.7\text{ mm}$ 代入投影矩阵 M ,最终的校正效果图像 6(d)所示。图像 6(e)为将准确的半径 $r = 10\text{ mm}$ 代入投影矩阵 M 所得的校正结果,可以看出,两者差别可以忽略不计,由此看出投影矩阵 M 对于半径估计的较小误差并不敏感,该实例的校正结果十分准确。

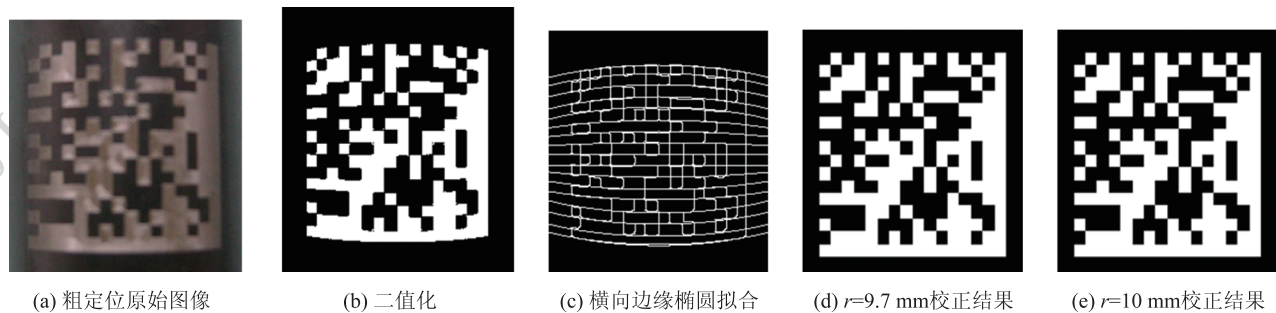


图 6 柱面扭曲畸变 2 维码校正实例 1

Fig. 6 Example 1 of distortion calibration of cylindrical two-dimensional bar code

实例 2 横向有效视野宽度 $2l = 8\text{ mm}$, 2 维条形码的实际大小为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 输入图像已经经过条形码粗定位裁切。本实例柱形零件半径 r 为 5 mm , 与实例 1 相比半径较小,且码区相对相机有较大的竖向偏移,因此 2 维条形码具有更严重的扭曲变形。通过拟合椭圆的短轴估计出的柱形零件半径 r 平均值为 4.85 mm ,最终校正结果如图 7(d)所示。

本文算法在 Visual Studio 2005 软件平台,内存 1 G , CPU 3.0 GHz 硬件平台下进行实验验证。对于 640×480 大小的含柱面扭曲 2 维条形码的图像平均校正时间为 740 ms 。

5 结 论

通过实验验证,本文基于相机标定的空间几何信息与图像信息相结合的柱面 2 维条形码扭曲畸变校正方法,与仅基于图像信息恢复曲面畸变目标的

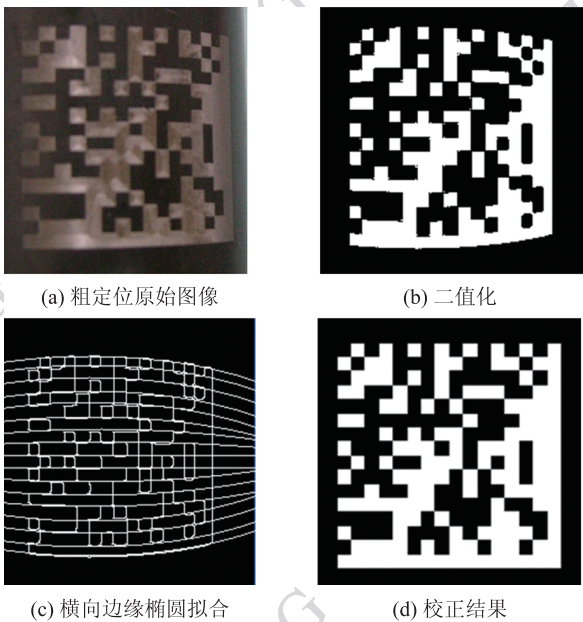


图 7 柱面扭曲畸变 2 维码校正实例 2

Fig. 7 Example 2 of distortion calibration of cylindrical two-dimensional bar code

方法相比,由于引入了先验的标定信息,算法结构更加简洁,效率更高。同时充分利用图像的信息估计出柱形零件的半径,使得操作过程更加方便,自动化程度更高。

通过分析扭曲形变的校正原理可知,校正的精确度与投影矩阵 M 的准确度息息相关,而 M 中只有参数 r 是未知和非精确的,因此参数 r 能够精确地估计直接关系到最终的校正结果。通过实验发现所估计的直径与实际直径之间有一定的误差,这是因为除了运算误差之外,还存在装置标定误差,相机非线性畸变误差等。因此在之后的工作中需要更加精确地设置标定及引入镜头非线性畸变值等。

参考文献 (References)

- [1] Wang S A, He W P, Zhang W, et al. Application research on the direct laser marking & 2D barcode technology on tool marking and identification [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(6):676-680. [王苏安,何卫平,张维,等. 直接激光标刻和2维条形码技术在刀具标识中的应用研究[J]. 中国机械工程,2007,18(6):676-680.]
- [2] Wang S A, He W P, Zhang W, et al. Direct tool marking & identification method [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(6):1169-1174. [王苏安,何卫平,张维,等. 刀具直接标刻与识别技术研究[J]. 计算机集成制造系统,2007,13(6):1169-1174.]
- [3] Ha J E. A new method for detecting data matrix under similarity transform for machine vision applications [J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2011, 9(4):737-741.
- [4] NASA. NASA-STD-6002 Applying data matrix identification symbols on aerospace parts [S]. Atlanta, Ga., USA: NASA Technical Standard Program Office, 2001.
- [5] Lavallee S. Registration for computer-integrated survey: methodology, state of the art Computer-integrated Surgery-Technology and Clinical Application [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1996: 77-97.
- [6] Chu C H, Yang D N, Pan Y L, et al. Stabilization and extraction of 2D barcodes for camera phones [J]. Multimedia Systems, 2011, 17(2):113-133.
- [7] Li X S, He W P, Lei L, et al. Geometrical distortion simulation analysis of data matrix code on tool cylinder [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(9):1349-1354. [李夏霜,何卫平,雷蕾,等. 刀具柱面 Data Matrix 码几何畸变的仿真分析[J]. 上海交通大学学报,2012,46(9):1349-1354.]
- [8] Xiang S M, Zhao G Y, Chen R, et al. Restoration of images scanned from thick bound documents [J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(1):42-48. [向世明,赵国英,陈睿,等. 积厚文档扫描图像校正[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(1):42-48.]
- [9] He W P, Lin Q S, Lei L, et al. Equipment and method of reading 2D barcode from cylinder metal parts: China, 201110100489 [P]. 2011-08-17. [何卫平,林清松,雷蕾,等. 一种金属柱面直接标刻2维条形码的识读装置及识读方法:中国,201110100489 [P]. 2011-08-17.]
- [10] He W P, Wang W, Lei L, et al. Recognition of 2D barcode images from highlight cylinder metal parts: China, 201110274647. X [P]. 2012-02-15. [何卫平,王伟,雷蕾,等. 高反光柱面金属上的2维条形码图像识别方法:中国,201110274647. X [P]. 2012-02-15.]
- [11] Zhang G, Wei Z. A position-distortion model of ellipse centre for perspective projection [J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14(8):1420-1426.
- [12] Wei Z Z. Flexible on-line 3D coordinates measurement system based on machine vision [D]. Beijing: Beihang University, 2003. [魏振忠. 基于机器视觉的在线柔性三坐标测量系统研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2003.]