DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2020.02.032

中图分类号:TP391

一种基于同心圆的环形编码标志设计与检测

张小迪,崔海华,程筱胜,韦号,张逸 (南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要:在视觉测量领域中,当被测目标缺少检测特征或目标背景较为复杂时,通常使用编码标志提高特征识别效率和定位精度。提出一种改进的环形编码标志以及相应的检测识别算法。在传统圆形编码标志的基础上采用同心圆约束有效提高识别效率与稳定性,采用具有预设编码字典的查询纠错算法进一步提高解码稳定性,基于交比不变性原理实现了圆心的定位修正。实验结果表明,环形编码标志在不同角度、距离以及复杂背景环境下均具有良好的检测识别效果。 关键词:视觉测量;编码标志;同心圆;解码;定位修正

Design and Detection of Circular Coded Marker Based on Concentric Circles

文章编号:1671-5276(2020)02-0133-04

ZHANG Xiaodi, CUI Haihua, CHENG XiaoSheng, WEI Hao, ZHANG Yi (College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In the field of visual measurement, when the target lacks detection features or its background is more complex, coded marker is usually used to improve the feature identification efficiency and location accuracy. In this paper, an improved circular coded marker and a corresponding detection algorithm are proposed. Based on the traditional circular coded marker, the concentric circles constraint is used to effectively improve the recognition efficiency and stability. A lookup correction algorithm with predefined encoding dictionary is used to further improve the decoding stability. Then, the location correction of center is achieved based on the principle of cross ratio invariance. The experimental results show that the circular coded marker has good detection and identification effects under different angles, distances and complex background environments.

Keywords: visual measurement; coded marker; concentric circles; decoding; location correction

文献标志码:B

0 引言

在视觉测量的许多应用中,可以通过对标志点进行编码,提高标志点的定位精度与检测效率,保证后续数据处理的可靠性。根据图案特征的不同,编码标志主要分为圆形编码标志、方形编码标志和分布式编码标志。目前,国内外学者对编码标志的检测识别做了大量研究工作。金 箔等^[1]在圆形编码标志上添加了3个定位符,提高了标志点容量,但同时也增大了标志点尺寸,降低了灵活性;宋丽梅等^[2]提出一种对数极坐标变换,将椭圆映射为直线, 在直线路径下实现标志点的解码工作,但该方法运算较为 复杂,影响识别效率;OLSON^[3]等设计的方形编码标志在 位姿估计、增强现实等领域具有较高应用价值,但方形标 志角点的提取精度会随着测量距离的增加而降低; DEGOL^[4]、YANG^[5]设计的彩色编码标志,可以有效提高 识别效率,但需要在不同色彩空间进行转换,且颜色信息 对光照等环境因素较为敏感,图像质量易受影响。

圆形特征不仅设计简单、抗噪性强,而且具有优良的 旋转平移和缩放无关性,广泛应用于视觉测量领域中。本 文提出一种改进的环形编码标志设计与检测算法,在传统 圆形编码标志的基础上采用同心圆约束有效提高识别效 率与稳定性,同时基于交比不变性原理使用同心圆特征进 行圆心定位修正。实验表明,编码标志具有良好的识别效 果和检测效率,且可以避免测量距离和透视投影角度引起 的圆心定位误差。

1 环形编码标志的设计

编码标志的设计应综合考虑编码容量、结构尺寸、识 别唯一性和定位可靠性等因素,本文将传统圆形编码标志 改进为一种环形编码标志。如图1所示,圆A和圆B、圆 C和圆D分别组成内圆环和外圆环,用于标志点特征识别 与圆心定位修正。各圆直径满足A:B:C:D=2:3: 5:6,根据实际需要可动态调整其结构尺寸与比例关系。 圆B和圆C之间为编码区,黑色和白色分别以二进制数0 和1表示,以任一位编码开始逆时针读取得到12位二进 制数,对此12位二进制数进行循环移位可得到12个二进 制数,其中最小值对应的十进制数即环形标志的编码。编 码区可进行不同数目的等分,如10、12、16,不同信息位对

第一作者简介:张小迪(1993—),男,硕士研究生,主要从事双目视觉、三维测量方面的研究。

应的理论编码容量如表1所示。



图1 环形编码标志

表1 信息位与编码容量的关系

信息位	10	12	16	20
编码容量	106	350	4 114	52 486

2 环形编码标志的检测

2.1 编码标志的检测识别流程

环形编码标志的检测识别大概分为特征提取、解码纠 错和定位修正三步,具体流程如图2所示。首先对原始图 像进行预处理,以提高后续算法的执行效率,主要包括图 像灰度化、高斯降噪、Canny边缘检测^[6]与轮廓提取;其次 对提取的轮廓进行椭圆拟合,进而提取同心圆特征;然后 对候选编码标志区域进行透视校正、信息解码与查询纠 错;最后对具有正确 ID 的编码标志进行圆心精确定位,输 出最终结果。



图 2 环形编码标志检测识别流程图

2.2 图像预处理

图像预处理的目的是提取满足编码标志特征的椭圆 轮廓。首先对图像进行灰度化处理,根据加权平均公式得 到较合理的灰度图像;原始图像往往含有噪声,考虑效率 与实用性,采用高斯滤波对图像进行降噪处理;然后使用 Canny 算子进行边缘检测得到具有强边缘信息的二值图 像,排除过短、过长以及曲率过小、过大等明显不符合椭圆 约束的边缘特征;最后使用 Suzuki 算法^[7]提取候选椭圆轮廓。

2.3 特征提取

为了确定编码标志圆心位置以及对编码区进行解码, 首先对提取轮廓进行椭圆拟合。椭圆的一般方程如下:

$$f(x,y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0$$
 (1)
最小二乘椭圆拟合的最优化目标函数为:

$$f(a) = \min \| Da \|^2 \quad s.t. \ 4ac-b^2 = 1 \quad (2)$$

式中: $D = [x^2 xy y^2 x y 1]$ 为 $n \times 6$ 矩阵; $a = [a b c d e f]^{T}$ 为最优椭圆系数向量。将椭圆的一般方程整理为标准 方程:

$$\frac{[(x-x_0)\cos\theta + (y-y_0)\sin\theta]^2}{r_a^2} + \frac{[(y-y_0)\cos\theta - (x-x_0)\sin\theta]^2}{r_b^2} = 1$$
(3)

式中: (x_0, y_0) 为椭圆中心; $2r_a \ 2r_b$ 分别为椭圆长轴、短轴; θ 为椭圆长轴与 x 轴夹角。根据椭圆几何参数设置阈值 条件进行初步过滤,排除不完整与误差较大的椭圆;

$$0 < |x_0 \pm r| < w \quad \text{and} \quad 0 < |y_0 \pm r| < h \tag{4}$$

$$r_a/r_b > \xi_1 \tag{5}$$

$$\xi_2 < l^2 / 4\pi s < \xi_3 \tag{6}$$

式中:w、h分别为图像宽度与高度; $r = \max(r_a, r_b); l$ 、s分别为轮廓周长和面积; $\xi_1 - \xi_3$ 为控制阈值。

编码标志具有明显的同心圆环特征,以此为约束条件,在上述过滤椭圆中进一步筛选候选标志点区域:

$$\| o^{\text{in}} - o^{\text{out}} \| < \min(r^{\text{in}}, r^{\text{out}})$$

$$\tag{7}$$

$$\sqrt{(r_a^{\rm in}/r_a^{\rm out}-t)^2 + (r_b^{\rm in}/r_b^{\rm out}-t)^2)} < \xi_4 \tag{8}$$

式中: o^{in} 、 o^{out} 分别表示内、外椭圆圆心;t为设计编码标志时圆 A 和圆 D 直径之比; ξ_4 为控制阈值。

2.4 解码纠错

经过上述特征提取后,已可排除绝大部分非标志点特征,确定候选编码标志在图像中的具体位置。在进行解码 操作之前,首先将候选区域进行透视校正,将椭圆映射为 标准圆。其坐标变换公式为:

$$\begin{bmatrix} x'\\ y'\\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x\\ y\\ 1 \end{bmatrix}$$
(9)

如图 3 所示,由于任意椭圆均存在最小外接矩形,因 此使用同心圆中较大椭圆外接矩形的 4 个顶点 q₁-q₄ 作 为变换点,以及对应的 4 个目标点 q'₁-q'₄,计算变换矩阵 H,然后基于双线性插值对局部图像进行透视校正。



图 3 椭圆透视校正示意图

得到校正图像后即可进行编码标志的解码操作, 本文采取的基于圆环路径进行像素点区域采样的解码 方法如下:

 编码标志设计为黑白两色,因此校正图像直方 图存在比较明显的双峰。使用 Otsu 算法^[8],通过搜索 计算类间方差最大值,得到图像前景与背景的最佳分 割阈值 T;

2)如图 4 所示,将编码区分为内编码区(圆环 BM) 与外编码区(圆环 MC)。首先在内编码区进行解码,从 0° 开始将圆环 BM 等分为 360 份,按逆时针方向分别在每份 区域中进行像素点均匀采样,计算灰度平均值 G,如G<T, 记 0,否则记 1。计算完成后,会得到一个 360 位的二进制 编码,然后对外编码区同样进行上述解码操作;

3)将上一步得到的内编码区二进制编码进行调整, 以第1个突变位作为起始位,将该位之前的二进制数全部 移动至末尾,组成一个新的二进制编码。搜索新编码中的 全部突变位,将360位二进制编码按式(10)进行缩减:

$$n_i = \text{Round}\left(\frac{d_i}{360/\text{bits}}\right)$$
 (10)

式中:Round 表示取整操作; d_i 为每相邻突变位的距离, bits 为编码标志的信息位位数(本文为 12), n_i 为相邻突 变位之间相同编码缩减后的位数。





经过上述计算,360 位二进制编码缩减为 12 位,对此 12 位编码进行循环移位得到 12 个二进制编码,其中最小 值对应的十进制数即为内编码区Code_{in},同理也可得到外 编码区Code_{at}。如Code_{in}=Code_{at},则表示解码成功。

编码字典本质上是由一系列预设 Code 与对应 ID 组成的查找表。为提高查询效率,本文使用散列表作为字典 底层数据结构。考虑实际情况,环境光照等因素可能会造 成解码错误,其中只有某一信息位发生错误的概率最大, 因此本文设计如下查询纠错方法:

①解码成功后,将得到的 Code 在字典中进行查询,如存在则认为 Code 正确并保存相应 ID;

②如查询失败,将 Code 重新写为 12 位二进制编码, 分别对每一位进行取反操作,得到 12 个二进制编码;

③将 12 个二进制编码分别进行循环移位,得到 12 个 对应的 Code,重新进行查询操作,如成功则保存相应 ID;

④输出具有正确 ID 编码标志的圆心坐标。

选取一组图片对上述特征提取与解码纠错算法进 行验证,实验结果如图 5 所示。可以看出本文算法可 行有效。



2.5 圆心精确定位

2.3 节提取的同心圆特征是由像素级边缘拟合得到的,为满足高精度定位要求,需要进行亚像素边缘提取。 由公式(1)可知,椭圆圆周上任意一点 *p*(*x*,*y*)的法向量为 *n*=(2*ax*+*by*+*d*,2*cy*+*bx*+*e*),沿梯度方向在边缘点两侧各取 *k*点,分别记为 *p_i*(*i*=-*k*,-*k*+1,...,*k*),其中相邻点间距为 一个像素。采用双线性插值计算各点的灰度值,取前向差 分和后向差分的平均值作为各对应点在法线方向的灰度 导数:

$$f'_{i} = \frac{|f_{i+1} - f_{i}| + |f_{i} - f_{i-1}|}{2}$$
(11)

式中 f_i 与 f_i 分别表示 p_i 对应的灰度值与灰度导数。

如图 6 所示,将计算得到的 f'_i进行高斯曲线拟合,显 然灰度导数最大值对应高斯曲线极值,此时极值点为 μ 。 因此像素点 p 对应的亚像素点 p'的坐标为:

$$\begin{cases} x' = x + \mu n_x / \parallel n \parallel \\ y' = y + \mu n_x / \parallel n \parallel \end{cases}$$
(12)

遍历全部像素级边缘点,即可完成椭圆的亚像素边缘 提取,得到具有较高定位精度的椭圆特征。



图 6 椭圆的亚像素边缘提取

空间圆经透视投影变换后存在圆心偏差^[9],即空间 圆圆心的真实投影点与图像中的椭圆圆心并不一致,因此 本文提出基于交比不变性的圆心修正方法。首先介绍两 个结论:

 1) 假设相机内参一定,则圆心偏差与空间圆半径及 相机外参有关。半径增大,偏差也随之增大;倾角增大,则 偏差一般先增大后减小;

 2)图像中的椭圆圆心与空间圆圆心在图像上的真实 投影点,两点之间的斜率与空间圆半径无关。

由结论 2) 可知, 以空间同心圆在图像中形成的两个 椭圆圆心确定一条直线,则该直线必然通过空间同心圆圆 心的真实投影点。如图 7 所示, *p*oit *xp*in分别为空间同心圆

100

在图像上形成的椭圆圆心,而空间同心圆圆心 p. 的真实 投影点为 p_t 。直线 l_t 通过 p_{out} 、 p_{in} ,且与椭圆分别交于 a_t 、 $b_{l,c_{l},d_{l}}$,而对应的空间直线为 l_{l} ,其与空间同心圆分别交 于 $a_{a,b}, c_{a,d}$ 。由交比不变性原理可知:

$$CR(a_s, d_s; p_s, p_s^{\infty}) = CR(b_s, c_s; p_s, p_s^{\infty}) = -1$$
 (13)

 $CR(a_t, d_t; p_t, p'_t) = CR(b_t, c_t; p_t, p'_t) = -1$ (14)

由公式(14)可解得 $p_{t,v}p'_{t}$ 两组解,如 $\|p_{t}-p_{in}\| <$ $\|p'_t - p_{in}\|$,则空间圆圆心的真实投影点为 p_t ,否则为 p'_t 。 如图 8 所示,采用上述算法进行圆心偏差修正,其中"+" 分别表示内外椭圆圆心,"×"表示经修正的圆心。如果以 中心处的角点作为参考,可见经过定位修正的圆心与角点 的重合度很高,而单纯采用拟合法求得的椭圆圆心却存在 较大的误差。



图 7 空间同心圆及其图像投影



图 8 圆心偏差及修正效果

实验结果及分析 3

本文提出的算法已全部使用 C++进行实现,为验证环 形编码标志的检测识别效果,以不同拍摄角度、测量距离以 及在复杂背景环境下分别采集编码标志图像进行检测实 验。实验使用的相机是映美精 DMK 33GP031,分辨率为 2592pixel × 1944pixel。程序的开发环境为 Visual Studio 2015,运行环境为处理器 Intel Core i5-4460、主 频3.20 GHz、内存 8 GB 的 PC。部分图像的检测效果以及不同 角度、距离与复杂背景下对应的识别正确率如图9所示。



(a) 40°





由图9(c)可知,拍摄角度<60°的平均识别正确率为 99.8%。当角度>70°时,识别正确率迅速下降,但此时仍 有95%的识别正确率。图9(f)、图9(i)表明,在一定测量 距离和复杂环境背景下,识别正确率可达90%以上。对 实验结果进行统计,编码标志的平均识别正确率为98%, 平均误识别率为0.5%,平均检测效率为0.24s/幅。可以 (下转第157页)



3.2 小弯梁成形有限元仿真

针对上小节使用两种方法展开的小弯梁毛坯零件,采 用相同的压型参数,通过 Abaqus 通用有限元仿真软件对 其进行有限元压型模拟仿真,分别得到了两种毛坯对应压 型成形后的小弯梁零件。为对比小弯梁两种展开方式压 型成形后和理论模型之间差异,对所有成形后零件的外轮 廓向其压型方向投影,得到如图 6 所示投影外轮廓曲线 图。从图中可以看出,两种坯料展开方法得到的压型成形 厚度零件外轮廓均和理论模型比较接近,且使用本文开发 的系统展开的小弯梁零件压型成形后更接近于理论模型。

4 结语

本文开发了一套基于 CATIA/CAA 二次开发的轨道 车辆压型件坯料展开系统,为用户在 CATIA 软件中开发 了以一步逆钣金零件毛坯展开算法为核心的用户界面,用 户只需输入钣金零件的基本参数、点击功能按钮,便能实 现对零件的精确展开。通过轨道车辆典型压型件小弯梁

(上接第136页)

看出本文提出的环形编码标志在各种条件下均具有良好 的识别效果和检测效率。

4 结语

在视觉测量领域中,编码标志的定位精度和识别效率对 于后续空间点的三维重建具有重要意义。本文提出一种环 形编码标志设计与检测方法,采用同心圆约束与字典查询纠 错算法有效提高识别效率与稳定性,基于交比不变性的圆心 偏差修正则避免了测量距离和透视投影角度对圆心定位精 度的影响。实验结果表明,本文提出的编码标志在各种环境 条件下,均具有良好的检测识别效果,实用性较高。但是本文 算法需要预设控制阈值,如何进行阈值的自适应选取和调 整,提高自动化程度,是下一步拟解决的问题。

参考文献:

- [1] 金滔, 董秀成. 一种环状编码标记点的设计及解码算法[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(4): 1217-1221.
- [2] 宋丽梅,陈昌曼,陈卓,等.环状编码标记点的检测与识别
 [J].光学精密工程,2013,21(12):3239-3247.



为实例进行验证,充分体现了该套系统对钣金零件毛坯展 开的精确性和高效性,并在一定程度上降低了钣金零件的 生产成本。本文所开发的板料展开系统对于工程实际确 定零件下料尺寸具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 张晖. 高速动车转向架动力学性能研究[D]. 长沙:中南大 学, 2011.
- [2] 鲁万彪,李国苹,解瑞豹. 车顶小弯梁成形工艺[J]. 金属加工 (冷加工),2016(S1): 103-105.
- [3] 吴建军,郭军. 钣金零件毛坯展开计算方法研究进展[J]. 航 空制造技术,2011(19): 26-31.
- [4] 崔静. 钣金零件的坯料展开与回弹算法研究[D]. 南京:南京 航空航天大学, 2016.
- [5] 彭欢. 基于 V5 Automation 的 CATIA 二次开发技术研究[J].
 电子机械工程,2012,28(2):61-64.
- [6] 张显藤. 橡皮囊成形钣金件初始毛坯快速设计系统的研究与 实现[D]. 南京;南京航空航天大学, 2013.
- [7] 朱明华,姜丹丹,张显藤,等. 飞机橡皮囊成形钣金零件毛坯 预示系统开发[J]. 航空制造技术,2014(10): 51-54.

收稿日期:2018-12-04

- [3] OLSON E. AprilTag: a robust and flexible visual fiducial system
 [C]. IEEE International Conferenceon Robotics and Automation.
 IEEE, 2011: 3400-3407.
- [4] DEGOL J, BRETL T, HOIEM D. ChromaTag: a colored marker and fast detection algorithm [C]. IEEE International Conference on Computer Vision. IEEE, 2017: 1472-1481.
- [5] YANG X, FANG S, KONG B, et al. Design of a color coded target for vision measurements [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(14): 3727-3732.
- [6] CANNY J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1986 (6): 679-698.
- [7] SUZUKI S. Topological structural analysis of digitized binary images by border following [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985, 30(1): 32-46.
- [8] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms
 [J]. IEEETransactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [9] 张广军. 视觉测量[M]. 北京:科学出版社, 2008: 70-76.

收稿日期:2019-08-23