

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2315037

## 注塑件机器视觉缺陷检测的几何矫正方法研究\*

蒋存波<sup>1</sup> 李昕焯<sup>1</sup> 金红<sup>1,2</sup> 丁俊良<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学信息科学与工程学院 桂林 541006; 2. 广西嵌入式技术与智能系统重点实验室(区级) 桂林 541006)

**摘要:** 针对多面体注塑零件在机器视觉缺陷检测中的零件图像几何形变问题,提出了基于几何光学原理的矫正算法。在拍摄定位误差不大于1 mm的条件下,所述方法矫正误差理论上 $<0.1$  mm,可满足注塑零件机器视觉缺陷检测的需要。首先对采集的图像进行预处理获取图像边缘;接着将轮廓线交点确定为零件顶点;根据顶点位置分割零件的不同表面并将其映射在二维平面;然后根据几何光学计算图像中每一个像素点的偏移量;最后使用基于几何光学的方法对图像中的像素点进行逐点矫正。利用一组六面体零件模拟实际工况,在不同的拍摄定位误差状态下进行实验,使用 Matlab 对矫正算法进行验证。实验结果表明,所述方法误差在0.1 mm以内,与理论分析相吻合,满足注塑零件在机器视觉缺陷检测中零件图像几何矫正精度的需要。

**关键词:** 机器视觉;平面映射;几何矫正;几何光学

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.40

## Research on geometric correction method for machine vision defect detection of injection molding parts

Jiang Cunbo<sup>1</sup> Li Xinye<sup>1</sup> Jin Hong<sup>1,2</sup> Ding Junliang<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Embedded Technology and Intelligent Systems (District level), Guilin 541006, China)

**Abstract:** A correction algorithm based on the principle of geometric optics is proposed to address the geometric deformation of part images in machine vision defect detection of polyhedral injection molded parts. Under the condition that the shooting positioning error is not greater than 1 mm, the correction error of the method is theoretically  $<0.1$  mm, which can meet the needs of machine vision defect detection for injection molded parts. Firstly, preprocess the collected images to obtain image edges; Next, the intersection points of the contour lines are determined as part vertices, and different surfaces of the part are segmented based on their positions and mapped onto a two-dimensional plane; Then, calculate the offset of each pixel in the image based on geometric optics; Finally, perform point by point correction on the pixels in the image. Using a set of hexahedral parts to simulate actual working conditions, experiments were conducted under different shooting positioning error states, and the correction algorithm was validated using Matlab. The experimental results show that the error of the proposed method is within 0.1 mm, which is consistent with theoretical analysis and meets the requirements for geometric correction accuracy of part images in machine vision defect detection of injection molded parts.

**Keywords:** machine vision; planar mapping; geometric correction; geometric optics

## 0 引言

积木拼块塑件在注塑过程中可能出现边缘缺料、多料(飞边)、变形、气泡、划痕、开裂等缺陷。当前,在积木塑件注塑过程中,使用人工视觉方式进行注塑零件缺陷抽检。随着对积木良品率要求的提高、以及人工成本的增长,现很

多制造企业期望利用机器视觉实现缺陷的自动检测。

虽然还没有采用机器视觉进行积木拼块注塑缺陷检测,但机器视觉检测技术的研究已取得了一些成果。陈硕等利用一个相机在垂直于零件单独表面的方向上拍摄图像,实现了对这个垂直面缺陷的检测<sup>[1-4]</sup>;郭强强<sup>[5]</sup>提出了一种基于直线度定义畸变函数的方法解决了镜头畸变的影

收稿日期:2023-11-21

\* 基金项目:国家自然科学基金(61906051)项目资助

响;吴杰鸿等<sup>[6]</sup>通过载频条纹相位解调分析结合畸变模型解决了由广角镜头引起的图像桶型畸变。刘得成等<sup>[7]</sup>提出一种基于畸变图像边缘几何特征进行图像几何矫正的方法,简化了矫正算法,提高了数字水印图像抗几何攻击的鲁棒性。刘婧<sup>[8]</sup>通过计算图像和文本纵横比的方法来矫正图像,降低了矫正误差和时间复杂度。LI 等<sup>[9]</sup>提出一种四点线性矫正法,提高了二维图像矫正精度。Eunkwan 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于地面控制点的无多重共线性的几何矫正模型,提高了地理编码精度。该方法可以使用较少的地面控制点就达到与传统轨道模型相似的性能。Zamfirdaus 等<sup>[11]</sup>提出了一种基于卷积神经网络的几何矫正方法,通过提取的图像特征进行图像对准,准确率达到了 91.78%。秦海等<sup>[12]</sup>使用基于几何矫正网络的矫正方法对文档图像进行几何畸变矫正,加快了网络收敛速度,提高了图像字符识别精度。李艺杰<sup>[13]</sup>对经几何矫正网络矫正的文档图像再次使用光照矫正网络进行矫正处理,进一步提高了识别精度。宋涛等<sup>[14]</sup>使用透视变换的方法矫正贝塞尔曲面的投影图像。王盛等<sup>[15]</sup>提出一种将特征标记图像作为纹理介质贴附于非规则投影表面的几何矫正方法,这些方法实现了投影图像的几何矫正,提高了人的视觉体验。胡东华等<sup>[16]</sup>提出一种使用圆形仪表轮廓来计算矫正矩阵的方法矫正畸变图像,提高了矫正精度。赵丽斌等<sup>[17]</sup>针对图像中几何畸变像素点实施重采样,通过计算畸变矫正参数的方式,求解矫正处理函数,实现图像几何矫正。Kio 等<sup>[18]</sup>提出了一种基于决策树分类的几何矫正方法,将分类得到的图片与模板图片进行匹配得到匹配点,通过匹配点和二次多项式模型进行几何矫正,提高了几何矫正的准确性。

当前研究成果解决了垂直拍摄条件下镜头畸变的二维图像矫正等问题,这些矫正方法均依赖被检测图像的标准数据。初步解决了图像畸变对人脸识别、病虫害识别、文字或符号识别、地理遥感图像处理、数字图像水印等的不利影响;也基本解决了图像畸变对桥梁等结构件典型裂纹等机器视觉检测的不利影响;几何矫正应用于投影系统中提高了人的视觉体验。文献[1,2,4]是最接近本文的生产线用零件缺陷检测应用,它们也是在垂直拍摄条件下进行平面轮廓缺陷检测。

注塑零件在机器视觉缺陷检测时需要获取零件图像,本文涉及的积木注塑件为多面体,为用 2 个图像传感器实现多面体尽可能多个平面的缺陷检测,因此摄像头平面与被检零件平面之间存在一定的倾斜角度,检测过程中由于零件的移动导致被检零件与两个传感器的距离存在一定的偏差,这又造成拍摄倾斜角存在一定偏差,这就导致同一被检对象在像平面的成像发生变化而引起视觉图像的几何畸变。从注塑模型腔脱模出的注塑零件角度、零件方向等具有一定的随机性,这就难以利用被检测零件的参考图像数据集。

本文的目的是在已实现镜头畸变几何矫正的基础上,

提供一种对倾斜拍摄的多面体注塑零件的视觉图像,在多个坐标投影面进行几何矫正,为后续的多面体轮廓的精确数字重构及缺陷检测准备条件。

## 1 基本原理与方法

### 1.1 基本原理与方法

积木注塑零件一般为多面体(轴类也可认为是多面体),当前普遍使用数字化设计方法,它的各面是由直线段和曲线段(圆弧、椭圆弧、渐开线等)连接构成,它的工程图是各面在直角  $X-Y-Z$  坐标系中各坐标平面的投影图,这些投影图是由直线段和曲线段(圆弧、椭圆弧、渐开线等)连接构成的数字模型,可以将这个数字模型作为缺陷检测的参考特征模型。

注塑生产过程中,塑件被注塑机从模具型腔中顶出,掉落到输送带上并被送到塑件周转箱收集。缺陷识别就是在零件输送过程中进行。按使用要求零件运动速度  $>20$  mm/S(通过多个并行检测线使每条检测线零件输送速度  $>20$  mm/S),两个相机在零件的运动方向间隔一定距离,当零件进入拍摄区指定位置时进行拍摄,如图 1 所示。

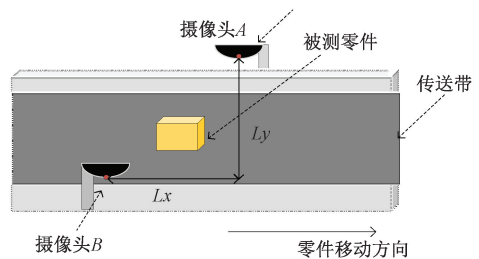


图 1 检测场景图

### 1.2 几何矫正基本原理

零件平面与像平面之间具有一定的倾斜角度,且这个角度随着零件的距离发生变化。由于像平面与零件平面之间的倾斜角  $\theta$ ,使得物体在像平面上的成像出现几何畸变,如图 2 所示。

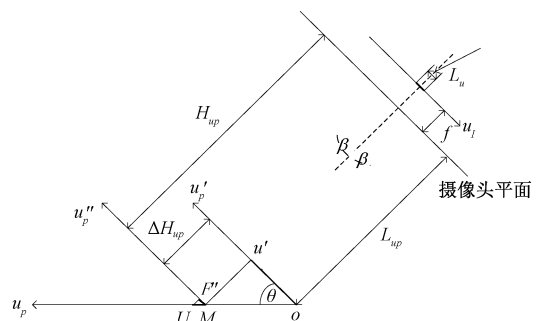


图 2 像平面与物平面倾斜时投影关系图

$u_p$  轴表示物平面上零件运动方向坐标轴,物平面的起始点作为  $u_p-v_p$  坐标平面的映射点  $o$  点, $u_p$  轴上的坐标值可以表示物体离开起点的距离(单位为 mm)。像平面坐

标轴用  $u_1-v_1$  表示,物体起始点在像平面上的对应点为像平面坐标原点。

图中  $u_1$  为摄像头平面,  $u'_p$  为过物平面起始点且与  $u_1$  面平行的平面,  $u''_p$  为过物平面  $M$  点且与  $u_1$  面平行的平面,  $u_p$  为物平面,  $L_{u_p}$  表示  $u_1$  平面到  $u'_p$  平面的距离,  $H_{u_p}$  表示摄像头平面到  $u''_p$  平面的距离(单位为 mm),  $\Delta H_{u_p}$  表示  $u'_p$  平面到  $u''_p$  平面的距离(单位为 mm),  $L_u$  表示物体上  $M$  点在像平面的坐标值(单位为 mm),  $\beta = \alpha/2$ ,  $\alpha$  为摄像头的视场角,  $\theta$  为像平面和物平面的夹角, 其中  $L_{u_p}$  (单位为 mm)、 $\theta$ 、 $f$  (单位为 mm) 的值都是已知的。

### 1) 物与像的映射关系

在一定距离内,物体在像平面的尺寸随着拍摄距离的变化而变化。用  $f$  表示相机焦距, 当一个长度为  $S_o$  (单位为 mm) 且与像平面平行(与拍摄方向垂直)的物体, 它与相机的距离用  $H$  (单位为 mm) 表示时, 成像长度  $S_i$  (单位为 mm) 随拍摄距离的变化关系如式(1)所示。

$$S_o = \frac{H}{f} S_i \quad (1)$$

### 2) 倾斜造成的影响

倾斜时,物体不同点( $u_p$  轴上任意一点  $M$ )与像平面的距离与坐标  $L_u$  和倾斜角  $\theta$  有关, 根据图 2 的几何关系可以得出式(2)所示关系。

$$H_{u_p} = L_{u_p} + \Delta H_{u_p} = L_{u_p} + Mu' = L_{u_p} + ou' \cdot \tan(\theta) = L_{u_p} + \frac{L_{u_p}}{f} \cdot L_u \cdot \tan(\theta) \quad (2)$$

将式(2)带入式(1)中, 就得到像平面  $u_1$  轴上距离原点坐标值为 1 的点 ( $L_u=1$ ) 在  $u''_p$  轴上的映射关系为:

$$u''_{p1} = \frac{H_{u_p}}{f} \cdot 1 = \left( L_{u_p} + \frac{L_{u_p}}{f} \cdot 1 \cdot \tan(\theta) \right) / f \cdot 1 \quad (3)$$

这样就可以得出像平面上  $u_1$  轴上坐标为  $u_1$  (单位为 mm) 的一个像素点在零件平面  $u_p$  上的映射关系  $u_p$  (单位为 mm), 以及在  $u''_p$  轴上的映射关系如式(4)所示。

$$\begin{cases} u''_p = \frac{H_{u_p}}{f} \cdot u_1 = \frac{L_{u_p} + \Delta H_{u_p}}{f} \cdot u_1 \\ u_p = \left( \frac{H_{u_p}}{f} \cdot u_1 \right) / \cos(\theta) = \frac{L_{u_p} + \Delta H_{u_p}}{f} \cdot u_1 / \cos(\theta) \\ p(u_p) = \frac{L_{u_p}}{f} \cdot \left( \frac{u_1}{\cos(\theta)} + \frac{u_1^2 \cdot \sin(\theta)}{f \cdot \cos^2(\theta)} \right) \end{cases} \quad (4)$$

### 3) 拍摄定位偏差的影响

位置检测可能导致的定位偏差用  $du$  表示(单位为 mm), 即初始距离从  $L_{u_p}$  变为  $L_{u_{pdu}}$ ,  $O'z$  为摄像头到水平面的高度(单位为 mm)垂心为  $O'$ ,  $O'x$  为物体起始点到  $O'$  点的距离(单位为 mm)。由于  $du < 1$  mm 所以初始距离如式(5)所示。

$$\begin{cases} L_{u_p} = \sqrt{O'z^2 + O'x^2} \\ L_{u_{pdu}} = \sqrt{O'z^2 + (O'x + du)^2} \end{cases} \quad (5)$$

此时将式(5)带入式(4)得到存在定位偏差时的映射关系  $u_{pdu}$  (单位为 mm)。

$$\begin{cases} u''_{pdu} = \frac{H_{u_{pdu}}}{f} \cdot u_1 = \left( L_{u_{pdu}} + \frac{L_{u_{pdu}}}{f} \cdot \tan(\theta) \cdot u_1 \right) \cdot u_1 / f \\ u_{pdu} = \frac{H_{u_{pdu}}}{f} \cdot u_1 / \cos(\theta) = \frac{L_{u_{pdu}} + \frac{L_{u_{pdu}}}{f} \cdot \tan(\theta) \cdot u_1}{f \cdot \cos(\theta)} \cdot u_1 \\ P(u_{pdu}) = \frac{\sqrt{O'z^2 + (O'x + du)^2}}{f} \cdot \left( \frac{u_1}{\cos(\theta)} + \frac{u_1^2 \cdot \sin(\theta)}{f \cdot \cos^2(\theta)} \right) \end{cases} \quad (6)$$

由定位误差造成的映射绝对误差(单位为 mm)如式(7)所示。

$$\begin{cases} e(du) = (u_p - u''_p) - (u_{pdu} - u''_{pdu}) = (L_{u_p} - L_{u_{pdu}}) / f \cdot \left( u_1 + \frac{u_1^2 \cdot \sin(\theta)}{f \cdot \cos(\theta)} \right) \cdot \left( \frac{1 - \cos(\theta)}{\cos(\theta)} \right) \\ e_p(du) = (\sqrt{O'z^2 + O'x^2} - \sqrt{O'z^2 + (O'x + du)^2}) / f \cdot \left( u_1 + \frac{u_1^2 \cdot \sin(\theta)}{f \cdot \cos(\theta)} \right) \cdot \left( \frac{1 - \cos(\theta)}{\cos(\theta)} \right) \end{cases} \quad (7)$$

相对误差如式(8)所示。

$$\begin{cases} \delta(du) = \frac{e(du)}{u_p - u''_p} 100\% = \frac{L_{u_p} - L_{u_{pdu}}}{L_{u_p}} \\ \delta_p(du) = \frac{eP(du)}{p(u_p) - p(u''_p)} = \frac{\sqrt{O'z^2 + O'x^2} - \sqrt{O'z^2 + (O'x + du)^2}}{\sqrt{O'z^2 + O'x^2}} \end{cases} \quad (8)$$

本文讨论的零件尺寸为 10~50 mm, 当前位置检测误差可以控制在  $dx < 1.0$  mm。当  $O'x = 115$  mm,  $O'z = 130$  mm, 定位偏差  $dx \leq 1.0$  mm 时,  $dx = du$ , 代入式(8)得到由此造成的最大相对误差在 0.5% 以内, 带入式(7)得到最大绝对误差为 0.04 mm。

## 2 矫正方法与步骤

### 2.1 被测零件与图像获取

依据图 1 部署相机, 零件运动方向定义为  $u_p$  轴正向, 在水平面上与  $u_p$  轴垂直方向定义为  $v_p$  轴, 与  $u_p-v_p$  面垂直的方向定义为  $w_p$  方向。量相机分列在传送带两侧, 在  $u_p$  轴方向上相距  $lx = 106$  mm, 在  $v_p$  轴方向上相距  $ly = 283$  mm, 摄像头 A 在  $u$  方向的角度为  $62^\circ$ , 在  $v$  方向的角度为  $18^\circ$ ; 摄像头 B 在  $u$  方向的角度为  $55^\circ$ , 在  $v$  方向的角度为  $18^\circ$ 。

以矩形六面体零件为例, 摄像头 A 可以拍到面 BCC1B1 记为面 1、面 DCC1D1 记为面 2、面 ABCD 记为面 5; 摄像头 B 可以拍到面 ADD1A1 记为面 3、面 ABB1A1 记为面 4、面 5。这样两个摄像头可以拍摄到零件的 5 个面以及 12 条的棱, 如图 3 所示。

### 2.2 图像预处理

对拍摄得到的图像进行灰度化处理, 从而凸显目标区

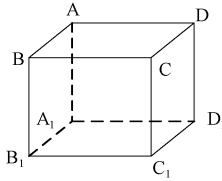


图 3 矩形六面体模型

域。为消除图片的噪声,本文使用  $3 \times 3$  模板下的中值滤波算法对图像进行滤波处理。由于拍摄所得的图片还含有除零件外的背景,需要消除背景信息对零件边缘检测造成干扰,使用大津法得到图像最佳阈值,并进行二值化,根据二值化结果提取零件图像。经上述处理后,获得去掉背景后的零件图像,如图 4 所示。

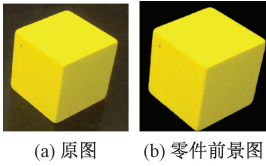


图 4 预处理图像

### 2.3 边缘检测

边缘检测是通过检测每一个像素点在其领域内灰度的变化率和方向的方式,来确定该点是否为图像边缘上的点。针对所研究的对象,由于 canny 算法能最大限度检测出图像中的真实边缘,且一个边缘只被标记一次不会造成重复标记,初步认为该算法适用于本文的研究对象。使用已标定的图像对 sobel、roberts、prewitt 和 canny 检测效果进行比较,其结果如图 5 所示。

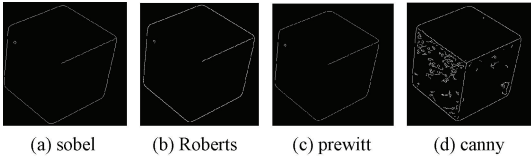


图 5 不同算子边缘检测对比图

根据图 5 可以看出使用 canny 算子检测效果最好,可以检测出零件全部的边缘,故本文采用 canny 算子。在进行 canny 边缘检测后,得到的图像还包含除目标轮廓以外的边缘轮廓,以轮廓面积作为区分,将轮廓面积小于阈值的轮廓认为是冗余轮廓并删除,最后只保留零件真实轮廓。如图 6 所示。

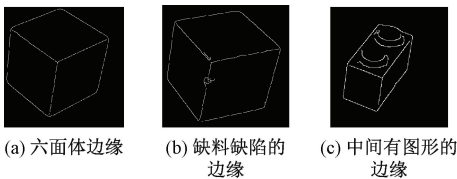


图 6 canny 算子边缘检测图

### 2.4 图像平面映射

根据零件边缘检测图分割出零件的 3 个表面,首先通过对零件轮廓图进行轮廓重构,提取每条棱的位置;然后根据轮廓位置确定零件的顶点位置;最后分割出 3 个平面并对其进行平面映射。

边缘检测图中构成零件各棱的轮廓点围绕质心线分布,这个质心线就是轮廓线的数字重构。本文使用基于质心线聚类的方法,获取零件的每一条轮廓线。因为被检零件为矩形六面体,所以用一次函数拟合轮廓线,根据函数的斜率和截距从小到大对轮廓线排序得到的轮廓顺序如图 7 所示。

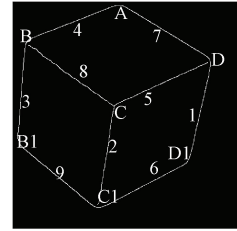


图 7 轮廓顺序图

根据轮廓顺序,使用式(9)计算两条直线的交点,得到零件的顶点坐标  $(u, v)$ 。

$$\begin{cases} v = A_j \cdot u + b_j (j \in 1, 2, 3, 4, 5) \\ v = A_k \cdot u + b_k (k \in 6, 7, 8, 9) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $A_j, b_j$  分别为第  $j$  条直线的斜率和截距,  $A_k, b_k$  分别为第  $k$  条直线的斜率和截距。将直线 3 和直线 8 带入式(9)获得顶点  $B$ ,其他顶点以此类推。用得到的 7 个顶点将图像中的 9 条轮廓线分为 6 组。顶点  $B$  为  $(u_B, v_B)$ , 顶点  $D$  为  $(u_D, v_D)$ , 图像中其余像素点记为  $p_i(u_i, v_i)$ , 之后将这 3 个点带入式(10)。

$$\begin{cases} \vec{BD} = (u_D - u_B, v_D - v_B) \\ \vec{p_iB} = (u_B - u_i, v_B - v_i) \\ \vec{F} = \vec{BD} \cdot \vec{p_iB} \end{cases} \quad (10)$$

如果  $\vec{F}$  的值大于 0 表示该像素点位于直线的上方,反之位于直线的下方,将  $B, D$  两点带入式(10)即可得到第 1 组线段;同理带入  $B, C_1$  两点可以得到第 2 组线段;带入  $D, C_1$  两点可以得到第 3 组线段;带入  $B_1, C$  两点可以得到第 4 组线段;带入  $A, C$  两点可以得到第 5 组和第 6 组线段。以 A 摄像头拍摄的图片为例,第 1、5、6 组线段构成面  $ABCD$ ;第 2、5、4 组线段构成面  $BCC_1B_1$ ;第 3、4、6 组线段构成面  $DCC_1D_1$ ,B 摄像头拍摄图片的处理方法同上。

以图 3 中的  $A_1$  点为原点,建立空间直角坐标系,  $A_1D_1$  方向为  $y$  轴,  $A_1B_1$  方向为  $x$  轴,  $A_1A$  方向为  $z$  轴。面  $A_1B_1C_1D_1$  和面 5 都映射在  $x-y$  平面上,面 1 和面 3 都映射在  $y-z$  平面上,面 2 和面 4 都映射在  $x-z$  平面上。

## 2.5 几何矫正算法的实现

以  $x-z$  平面为例,矫正时需要每一个像素点进行  $x$  方向和  $z$  方向上的矫正。以  $x$  方向为例,遍历图像的所有像素点,以点  $m(x_{\min}, y_{\min})$  为基准点,计算其余  $mi(x_i, y_i)$  点到  $m$  点的距离  $L_{mi}$ ,将距离值带入式(3)得到畸变后的长度如式(11)所示,带入式(4)得到理论长度如式(12)所示。

$$u_p'' = \frac{H_{up}}{f} \cdot L_{mi} = \left( L_{up} + \frac{L_{up}}{f} \cdot L_{mi} \cdot \tan(\theta) \right) / f \cdot L_{mi} \quad (11)$$

$$u_p = \left( \frac{H_{up}}{f} \cdot L_{mi} \right) / \cos(\theta) = \frac{L_{up} + \Delta H_{up}}{f} \cdot L_{mi} / \cos(\theta) \quad (12)$$

根据式(11)、(12)得到该点  $mi$  在  $x$  方向的偏移量  $o_{xi}$  如式(13)所示。

$$o_{xi} = u_p - u_p'' = \frac{L_{up} \cdot (1 - \cos(\theta))}{f} \left( \frac{L_{mi}}{\cos(\theta)} + \frac{L_{mi}^2 \cdot \sin(\theta)}{f \cdot \cos^2(\theta)} \right) \quad (13)$$

以此类推, $z$  方向上的偏移量计算方法也是如此,  $o_{zi}$  为某个像素点在  $z$  方向上的误差。那么该像素点的误差为  $o_{Li} = \sqrt{o_{xi}^2 + o_{zi}^2}$ 。以点  $m(x_{\min}, y_{\min})$  和点  $n(x_{\max}, y_{\max})$  构成直线的偏转角度  $\gamma$ ,为矫正图像时的矫正方向。 $x, z$  方向的矫正值分别为  $o_{Lxi} = o_{Li} \times \cos(\gamma), o_{Lzi} = o_{Li} \times \sin(\gamma)$ 。在  $y-z$  平面的矫正同  $x-z$  平面一样。

## 3 图像的具体获取方法

### 3.1 图像传感器及布置

使用两个相机(图像传感器),相机均采用像素为500万的 ov5640 视觉传感器,视场角为  $68^\circ$ ,焦距为 3.5 mm。依据图1分别部署在传送带的两侧,零件在传送带上运动,到达拍摄位置时,同步启动两个相机进行拍摄。

### 3.2 拍摄控制

两个相机分别由2个 GD32F407 处理器控制,作为从节点通过 485 总线接入现场网络。利用2个光电传感器检测输送带上的被测零件,第1个光电传感器检测到零件进入拍摄区域时,摄像头进入预备状态,第2个传感器检测到零件,同步启动2个相机进行拍摄,拍摄时间差不超过  $10 \mu\text{s}$ 。图像数据通过 485 总线传送到主设备(STM32 H743 处理器为主构成)。

## 4 实验验证

### 4.1 零件样品

使用5个矩形六面体零件进行标定,分别是边长为2 cm的正六面体、边长为2.5 cm的正六面体、边长为3 cm的正六面体、棱长为  $0.9 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$  的长方体标准块以及棱长为  $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$  的长方体体积木在模拟环境下进行拍摄。

### 4.2 图像映射

实验选择边长为2、2.5、3 cm的正六面体木,棱长为  $0.9 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$  的长方体标准块以及棱长为  $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$  的长方体体积木进行研究。边长为2 cm的正方体映射效果图如图8所示;边长为2.5 cm的正方体映射效果图如图9所示;边长为3 cm的正方体映射效果图如图10所示;棱长为  $0.9 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$  的长方体标准块映射效果图如图11所示;棱长为  $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$  的长方体体积木映射效果图如图12所示。

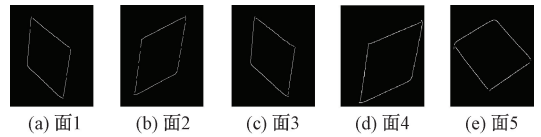


图8 边长为2 cm的正方体图像映射结果

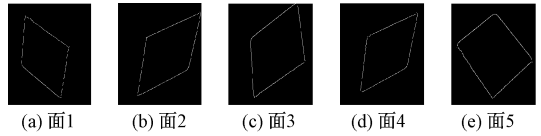


图9 边长为2.5 cm的正方体图像映射结果

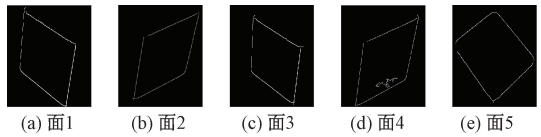


图10 边长为3 cm的正方体图像映射结果

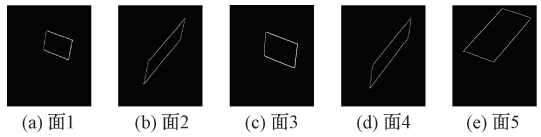


图11 棱长为  $0.9 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$  的长方体标准块图像映射结果



图12 棱长为  $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$  的长方体图像映射结果

### 4.3 几何矫正算法 Matlab 验证

对上述分割后的图像进行几何矫正,边长为2 cm的正方体矫正效果图如图13所示;边长为2.5 cm的正方体矫正效果图如图14所示;边长为3 cm的正方体矫正效果图如图15所示;棱长为  $0.9 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$  的长方体标准块矫正效果图如图16所示;棱长为  $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$  的长方体体积木矫正效果图如图17所示。

计算校正后的图像边长,边长为2 cm的正方体边长数据如表1所示;边长为2.5 cm的正方体边长数据如表2所

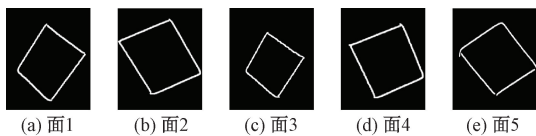


图 13 边长为 2 cm 的正方体几何矫正结果

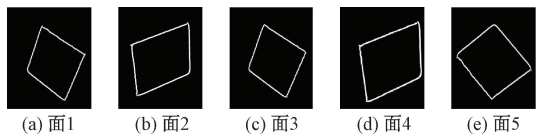


图 14 边长为 2.5 cm 的正方体几何矫正结果

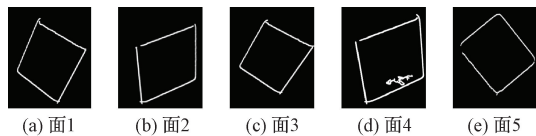


图 15 边长为 3 cm 的正方体几何矫正结果

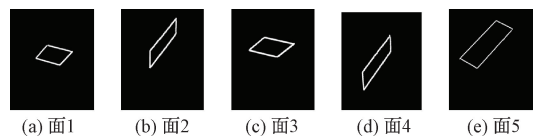


图 16 棱长为 0.9 cm×1 cm×3 cm 的长方体标准块几何矫正结果



图 17 棱长为 2 cm×2 cm×4 cm 的长方体几何矫正结果

示;边长为 3 cm 的正方体边长数据如表 3 所示;棱长为 0.9 cm×1 cm×3 cm 的长方体标准块的边长数据如表 4 所示;棱长为 2 cm×2 cm×4 cm 的长方体的边长数据如表 5 所示,表中的绝对误差和相对误差均为其绝对值。

表 1 边长为 2 cm 的正方体棱长数据

序号	实际长度/ mm	矫正长度/ mm	绝对误差/ mm	相对误差/ %
棱 1	18.800	18.791	0.009	0.05
棱 2	21.000	21.038	0.038	0.18
棱 3	20.800	20.809	0.009	0.04
棱 4	19.200	19.283	0.083	0.44
棱 5	18.000	17.953	0.047	0.26
棱 6	19.700	19.720	0.020	0.10
棱 7	18.200	18.263	0.063	0.34
棱 8	18.640	18.550	0.090	0.48
棱 9	17.800	17.807	0.007	0.04
棱 10	17.700	17.695	0.005	0.03
棱 11	18.450	18.485	0.035	0.19
棱 12	18.640	18.609	0.031	0.16

表 2 边长为 2.5 cm 的正方体棱长数据

序号	实际长度/ mm	矫正长度/ mm	绝对误差/ mm	相对误差/ %
棱 1	24.900	24.826	0.074	0.23
棱 2	24.650	24.719	0.069	0.28
棱 3	24.000	23.995	0.005	0.02
棱 4	24.200	24.193	0.007	0.03
棱 5	25.000	24.984	0.016	0.06
棱 6	24.800	24.842	0.042	0.17
棱 7	24.500	24.449	0.051	0.21
棱 8	24.100	24.125	0.025	0.10
棱 9	24.100	24.082	0.018	0.07
棱 10	24.400	24.407	0.007	0.03
棱 11	25.000	25.022	0.022	0.08
棱 12	24.900	24.871	0.029	0.12

表 3 边长为 3 cm 的正方体棱长数据

序号	实际长度/ mm	矫正长度/ mm	绝对误差/ mm	相对误差/ %
棱 1	28.600	28.683	0.083	0.29
棱 2	28.100	28.090	0.010	0.04
棱 3	29.760	29.767	0.007	0.02
棱 4	29.490	29.456	0.034	0.12
棱 5	29.000	29.038	0.038	0.13
棱 6	29.210	29.146	0.064	0.22
棱 7	28.800	28.812	0.012	0.04
棱 8	29.310	29.387	0.077	0.26
棱 9	28.500	28.554	0.054	0.20
棱 10	29.250	29.308	0.058	0.20
棱 11	29.000	29.072	0.072	0.25
棱 12	29.480	29.407	0.073	0.25

表 4 棱长为 0.9 cm×1 cm×3 cm 的标准块棱长数据

序号	实际长度/ mm	矫正长度/ mm	绝对误差/ mm	相对误差/ %
棱 1	10.000	10.006	0.006	0.06
棱 2	10.000	9.978	0.022	0.22
棱 3	9.000	9.094	0.094	1.05
棱 4	30.000	30.092	0.092	0.31
棱 5	30.000	29.907	0.093	0.31
棱 6	9.000	8.931	0.069	0.77
棱 7	9.000	9.070	0.070	0.78
棱 8	10.000	9.968	0.032	0.32
棱 9	30.000	30.091	0.091	0.30
棱 10	9.000	8.941	0.059	0.65
棱 11	10.000	10.022	0.022	0.22
棱 12	30.000	29.908	0.092	0.31

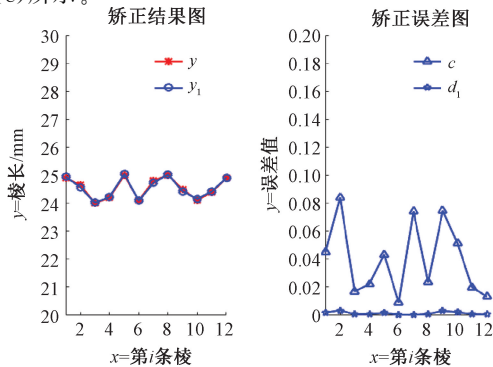
表5 棱长为2 cm×2 cm×4 cm的长方体棱长数据

序号	实际长度/	矫正长度/	绝对误差/	相对误差/
	mm	mm	mm	%
棱1	18.900	18.899	0.001	0.06
棱2	19.300	19.341	0.041	0.21
棱3	19.100	19.088	0.012	0.06
棱4	19.500	19.472	0.028	0.14
棱5	39.480	39.549	0.069	0.18
棱6	39.000	38.928	0.072	0.19
棱7	18.930	18.955	0.025	0.13
棱8	19.530	19.570	0.040	0.21
棱9	19.140	19.116	0.024	0.13
棱10	19.510	19.469	0.041	0.21
棱11	39.510	39.504	0.006	0.01
棱12	39.420	39.344	0.076	0.19

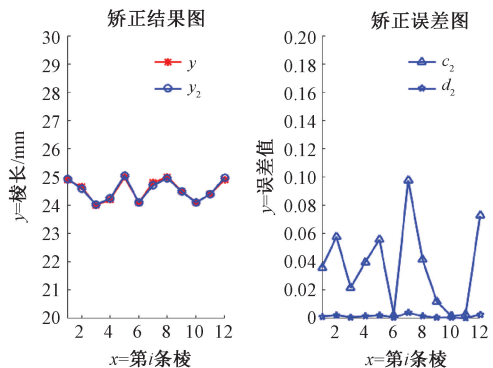
实验结果显示使用本文的矫正算法矫正后的棱长数据和实际棱长数据的绝对误差在0.1 mm以内,满足玩具类零件的精度需要。

4.4 距离检测误差实验验证

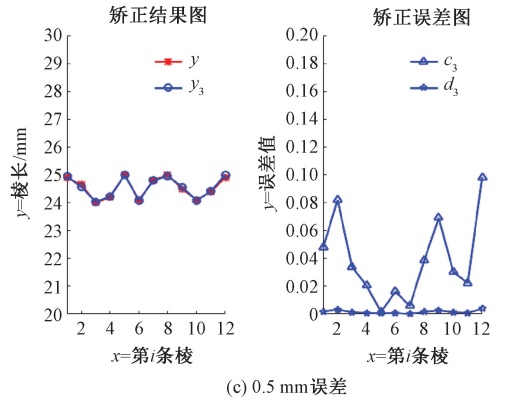
分别选择距离误差为0.2 mm、0.4 mm、0.5 mm、0.56 mm、0.8 mm的位置拍摄图像并进行几何矫正。距离误差为0.2 mm时矫正结果如图18(a)所示,距离误差为0.4 mm时矫正结果如图18(b)所示,距离误差为0.5 mm时矫正结果如图18(c)所示,距离误差为0.56 mm时矫正结果如图18(d)所示,距离误差为0.8 mm时矫正结果如图18(e)所示。



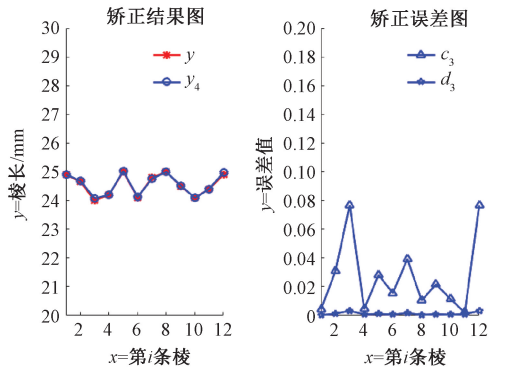
(a) 0.2 mm误差



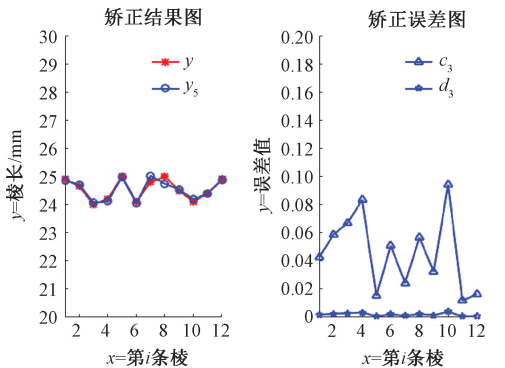
(b) 0.4 mm误差



(c) 0.5 mm误差



(d) 0.56 mm误差



(e) 0.86 mm误差

图18 引入距离检测误差后的矫正结果图

图中  $y$  为期望值,  $y_k$  为测量值,  $c_k$  为绝对误差的绝对值,  $d_k$  为相对误差的绝对值 ( $k=1, 2, 3, 4, 5$ )。

从图中可以看出,得到的矫正结果的误差在0.1 mm以内,满足玩具类零件的精度需要。

4.5 对比实验

文献[8]进行几何矫正时依赖被检测图像的标准数据设置纵横比。为和本文算法比较,对本文中经过预处理的图像使用文献8中提出的锁定纵横比的方法进行矫正,纵横比设置为1:1。实验使用边长为2.5 cm的正方体零件进行矫正,其矫正效果图如图19所示。

计算校正后的图像边长,边长为2.5 cm正方体的边长数据如表6所示。

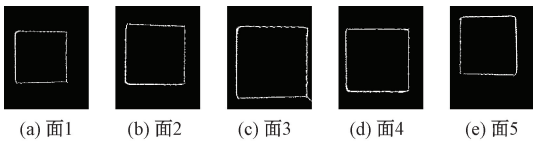


图 19 文献 8 矫正效果图

表 6 文献 8 校正后 2.5 cm 正方体棱长数据

序号	实际长度/ mm	矫正长度/ mm	绝对误差/ mm	相对误差/ %
棱 1	24.900	24.462	0.408	1.64
棱 2	24.650	24.834	0.184	0.75
棱 3	24.000	24.208	0.208	0.86
棱 4	24.200	24.216	0.016	0.06
棱 5	25.000	24.622	0.378	1.51
棱 6	24.800	24.929	0.129	0.52
棱 7	24.500	24.402	0.098	0.4
棱 8	24.100	24.447	0.347	1.44
棱 9	24.100	24.624	0.524	2.18
棱 10	24.400	24.428	0.028	0.12
棱 11	25.000	24.872	0.128	0.51
棱 12	24.900	24.999	0.099	0.40

实验结果显示使用文献 8 的矫正算法矫正后的边长数据和实际边长数据的绝对误差已经超出 0.1 mm, 最大误差在 0.5 mm, 无法满足玩具类零件的精度需要。本文方法检测的具体数据见表 2。

## 5 结 论

针对多面体注塑零件在机器视觉缺陷检测中的零件几何形变问题, 本文提出了基于几何光学成像原理的图像几何矫正方法。首先使用两个摄像头拍摄零件图像; 其次根据零件颜色与背景颜色的不同使用大津法获得最佳分割阈值对采集得到的图像进行前景分割; 之后对前景图像进行预处理得到图像全部的边缘轮廓; 接着基于质心线对轮廓点进行聚类获得每条轮廓线, 根据轮廓线得到零件的顶点位置, 利用向量点乘的结果判断每条轮廓和顶点的位置关系以此得到零件每个表面的图像, 并将其映射到二维平面; 最后对分割后的图像使用基于几何光学成像原理的方法进行几何校正。实验结果表明, 使用本文方法对 10~50 mm 的矩形六面体积木零件: 边长为 2 cm、2.5 cm、3 cm 的正方体, 棱长为 0.9 cm×1 cm×3 cm 的长方体标准块以及棱长为 2 cm×2 cm×4 cm 的长方体进行几何矫正, 校正后的零件边长与实际零件边长之间的误差小于 0.1 mm, 满足注塑零件在机器视觉缺陷检测中零件图像几何矫正精度的需要。在不同的拍摄定位误差状态下进行实验, 当定位误差为 0.2 mm、0.4 mm、0.5 mm、0.56 mm、0.8 mm 时, 校正后

的零件边长与实际零件边长之间的误差小于 0.1 mm, 满足注塑零件在机器视觉缺陷检测中零件图像几何矫正精度的需要。

## 参考文献

- [1] 陈硕, 林洪毅, 卞抱元, 等. 基于机器视觉的注塑齿轮缺陷检测系统研究[J]. 机电工程, 2022, 39(9): 1243-1249.
- [2] 毛卫平, 高伟, 顾寄南, 等. 基于机器视觉的圆柱形蜂窝陶瓷侧面裂隙检测[J]. 电子测量技术, 2022, 45(2): 117-122.
- [3] HABIB M T, MAJUMDER A, JAKARIA A Z M, et al. Machine vision based papaya disease recognition[J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2020, 32(3): 300-309.
- [4] CHEN Y G, SHU Y F, LI X M, et al. Research on detection algorithm of lithium battery surface defects based on embedded machine vision[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2021, 41(3): 4327-4335.
- [5] 郭强强. 相机镜头畸变非量测校正算法研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- [6] 吴杰鸿, 周维帅, 李海, 等. 采用条纹分析的镜头畸变测量与校正[J]. 光学技术, 2021, 47(4): 422-427.
- [7] 刘得成. 基于 HVS 和几何矫正的彩色数字图像盲水印算法研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2021.
- [8] 刘婧. 基于 FPGA 的数字图像几何畸变矫正方法研究[J]. 潍坊学院学报, 2022, 22(2): 9-13.
- [9] LI J, LI X, LIU K, et al. Crack identification for bridge structures using an unmanned aerial vehicle (UAV) incorporating image geometric correction[J]. Buildings, 2022, 12(11): 1869.
- [10] EUNKWAN L, SEUNGHWAN H, YOONJO C, et al. Error budget analysis of geocoding and geometric correction for KOMPSAT-5 SAR imagery[J]. GIScience Remote Sensing, 2022, 59(1): 1938-1955.
- [11] ZAMFIRDAUS S, NORAMIZA H, AZIAH A, et al. Multi-temporal satellite image correction based on CNN features and adaptive contrast enhancement[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1064(1): 012019.
- [12] 秦海, 李艺杰, 梁桥康, 等. 针对文档图像的非对称式几何校正网络[J]. 中国图象图形学报, 2023, 28(8): 2314-2329.
- [13] 李艺杰. 文档图像的端到端几何与光照校正方法及应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
- [14] 宋涛, 祁继辉, 侯培国, 等. 基于贝塞尔曲面的投影图像几何优化方法[J]. 燕山大学学报, 2021, 45(5): 449-455.
- [15] 王盛, 王魏平, 张真. 基于非规则表面分割的纹理贴附



- 式几何校正算法[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(11):154-158,238.
- [16] 胡东华, 闫坤, 辛文凯, 等. 基于轮廓的圆形仪表自动透视校正[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(1):32-39.
- [17] 赵丽斌, 杜娇娇, 贺铮. 无人机遥感图像几何畸变校正全过程控制方法研究[J/OL]. 计算机测量与控制, 1-11 [2024-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4762.TP.20231019.1313.022.html>.
- [18] KIO G O, SHARK K L. Geometric distortion correction for projections on non-planar and deformable surfaces based on displacement of peripheral image points [J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2022, 68(2):101-113.

## 作者简介

**蒋存波**, 教授, 研究生导师, 主要研究方向为嵌入式技术、智能检测与控制技术、物联网技术。

E-mail:jiangcunbo@163.com

**李昕焯**, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式与智能仪器。

E-mail:1194213046@qq.com

**金红**(通信作者), 教授, 研究生导师, 主要研究方向为智能检测技术与智能仪器、嵌入式系统、物联网技术。

E-mail:jh\_gl@163.com

**丁俊良**, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式与智能仪器。

E-mail:782023231@qq.com