

基于双目视觉的引磁片定位与测量研究

朱荣华¹, 葛广英¹, 张广世¹, 杨晓蕊¹, 孙 群²

(1. 聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059;

2. 聊城大学 机械与汽车工程学院, 山东 聊城 252059)

摘要: 为了提高大批量生产中超薄磁性车载手机支架铁片的测量精度, 提出采用双目视觉技术对引磁片定位, 并基于鞍点法建立坐标系实现引磁片的高精度测量; 首先通过 HALCON 的系统标定实现引磁片图像对的立体校正; 利用金字塔算法与带有缩放的亚像素形状模板匹配实现引磁片特征点的提取; 然后基于归一化互相关 NCC (Normalized Cross-Correlation) 的灰度匹配算法快速完成特征点的立体匹配; 结合双目测距原理、坐标仿射变换对特征点重构获取以左相机为参考系下的 3D 坐标; 最后通过空间曲线拟合公式和点积运算实现引磁片的高精度测量; 实验结果表明, 测量半径的误差小于 0.1 mm、误差率小于 1%; 测量厚度误差小于 0.1 mm、误差率小于 6%, 可有效地对超薄引磁片进行定位及尺寸测量。

关键词: HALCON; 双目视觉; 系统标定; 带缩放的亚像素形状模板匹配; 立体匹配; 立体重建

Research on Magnetic Sheet Positioning and Measuring Based on Binocular Vision

Zhu Ronghua¹, Ge Guangying¹, Zhang Guangshi¹, Yang Xiaorui¹, Sun Qun²

(1. College of Physics and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;

2. College of Mechanical and Automotive Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract: To improve the measurement accuracy of the ultra-thin magnetic car phone holder iron piece in mass production, this paper presents using binocular vision technology to locate the target area, and introduce saddle point method to achieve high precision measurement of thickness. Firstly, HALCON-based stereo calibration method is proposed to realize stereo correction of the image of the magnetic sheet. Subpixel template matching with scaling and pyramid algorithm are presented, magnetic sheet feature points are extracted accurately. Secondly, the stereo matching of feature points can be completed quickly according to gray-value-based template matching using the NCC (Normalized Cross-Correlation). The binocular parallax principle and coordinate affine transformation are combined to complete reconstruction of feature points. Finally, the magnetic sheet is measured with high precision by the space curve fitting formula and the dot product operation. The experimental results show that the error of the measurement radius is less than 0.1 mm, the error rate is less than 1%; the error of the thickness is less than 0.1 mm, the error rate is less than 6%, which can effectively locate and measure ultra-thin magnetic sheets.

Keywords: HALCON; stereo vision; system calibration; subpixel shape template matching with scaling; stereo matching; 3D reconstruction

0 引言

随着工业 4.0 战略风潮的兴起, 机器视觉被广泛应用到包装机械、交通^[1]、医疗^[2-3]、工业生产^[4]、电子制造等国民经济的多个领域^[5], 成为提高生产的自动化程度和机器人智能程度的一种重要手段。机器视觉主要分为单目和多目两大类视觉技术, 在对目标进行定位、测量和重建等操作中, 常常需要获取目标的三维坐标, 而单目视觉无法感知空间的三维信息; 虽然基于结构光、激光、RGB-D 深度相机的主动测距方法能快速实现准确、无干预地三维

定位及测量, 但设备成本高, 无法达到普及应用^[6]。另外, 对于自动化生产中的大量重复性测量工作, 人工视觉很难长时间保持精神集中的状态, 常出现视力疲劳、不适于危险工作环境、易损伤工件表面等问题, 很难达到自动化生产的高精度要求。相较之下, 基于非接触式双目立体视觉恢复三维信息的方法进行测量, 该测量方式几乎不需要人工参与, 具有设备要求较低、连续性高、非接触无损伤和对人眼无害等优点, 同时还可以使测量效率及测量的精度得到一定提升。因此非接触式双目立体视觉技术具有较高的研究价值, 对自动化大批生产中工件的高精度测量具有重要研究意义。综合考虑, 非接触式双目立体视觉技术可以满足超薄磁性车载手机支架铁片的准确定位及高精度的测量要求。

HALCON 是德国 MVtec 公司开发的一套完善的视觉算法包^[7]。它包含 3D 匹配、运动检测、三维重建、多目立

收稿日期: 2019-01-18; 修回日期: 2019-02-27。

基金项目: 中央引导地方科技发展专项资金计划。

作者简介: 朱荣华(1994-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事图像处理方向的研究。

葛广英(1964-), 男, 山东聊城人, 教授, 硕士生导师, 主要从事图像处理、物联网方向的研究。

体视觉和深度学习等高级算法, 具有快速、精确、高效、稳定的优点, 能够实现图像拼接、边缘检测、摄像机标定、测量以及深度学习(语义分割)等。此软件应用领域广泛, 使用图像处理的地方均可以使用 HALCON, 涵盖卫星遥感, 生物医学, 监控, 到工业生产上的自动化测量。本文研究基于 HALCON 图像处理平台, 利用双目立体视觉技术实现对超薄工件引磁片的高精度定位与测量, 并通过大量实验验证了方法的可行性。

1 双目视觉系统

1.1 双目视觉测量

双目视觉三维测量是基于视差原理, 通过建立两个摄像机的图像平面与三维空间中的目标物体之间的三角几何模型, 利用特征点匹配关系和三角法原理进行物体在三维空间上的信息获取^[8]。双目立体视觉系统的结构大体分两种: 一种是轴线汇聚系统结构, 另一种是轴线平行系统结构。

本实验采用由两组完全相同的相机和镜头组成的轴线平行系统结构, 选用的是视维数字图像技术有限公司的 M-1614MP2 工业镜头和型号为 MV-VS120 CCD 彩色工业相机。在轴线平行的立体视觉系统中, 左右两个摄像机的焦距及其内部参数均相同, 这为寻找空间点在左右成像平面上投影点之间的匹配关系提供了很好的条件。在 HALCON 软件 HDevelop 开发环境下, 基于 HALCON 双目立体视觉技术, 对目标图像的自动采集、系统标定与立体校正、特征点提取、立体匹配、立体重建等相结合的非接触式三维信息重构算法进行研究。具体算法流程如图 1 所示。

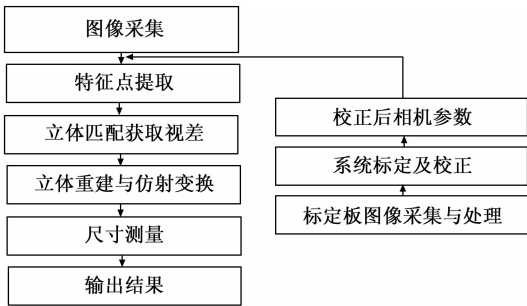


图 1 软件算法流程

1.2 系统标定与立体校正

在求取空间点的三维坐标之前, 双目视觉系统要解决的首要任务是确定摄像机参数, 确定摄像机参数是通过校准双目立体系统来实现的。系统标定是指建立摄像机模型, 由已知标定板的特征点像素坐标和世界坐标来求解摄像机的内外参数^[9]。建立摄像机模型, 即通过坐标系转换、实验及计算的方法求解摄像机的模型参数。摄像机投影^[6]中的像素坐标系到世界坐标系的转换过程为:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = Z_c \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, w 为图像像素坐标系; d_x, d_y 为像素单元; f 为畸变系数; $O_c X_c Y_c Z_c$ 为相机坐标系; $O_w X_w Y_w Z_w$ 为世界坐标系; \mathbf{R}, \mathbf{t} 为旋转、平移矩阵; M_1, M_2 为相机内、外部参数。双目标定方法与单目标定的方法相同, 立体系统标定完成后, 左右摄像机的相对位置以及各自焦距等参数即可确定, 不可以再次更改。若更改位置或改变焦距, 需要重新进行标定^[10]。准确的标定摄像机是完成双目视觉定位与测量的前提。

实验采用张正友标定法对系统进行标定, 基于 HALCON 图像处理平台, 通过左右摄像机在可视范围内同时采集标定板在不同空间位置下的标定板图像, 利用 HALCON 提供的强大功能算法动态库来完成标定板图像的处理过程。如图 2 (a) 所示, 选用的标定板图像模型是 (30×30) mm 的黑色圆型标志点标定板。通过平滑标定板图像、亚像素阈值分割和亚像素边缘提取方法, 定位标定板位置并分割出标定板区域; 结合边缘提取、圆心确定等一系列操作, 提取每个标定板区域中 49 个圆型标志点的图像坐标。实验采集 20 组不同姿态下的标定板图像, 通过 20 次标定取平均值的方法, 确定两个摄像机的内、外参数以完成系统的标定, 其中一组标定板处理过程如图 2 (b)、(c) 所示。

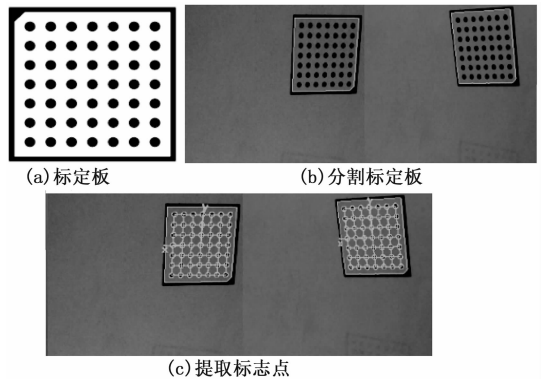
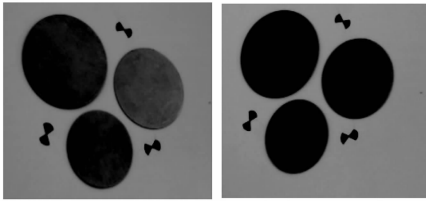
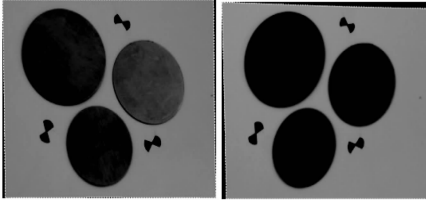


图 2 标定板图像处理

完成系统标定后输出用于校正立体图像对的映射图, 将采集到的工件图像对通过映射图校正为标准的外极线几何结构, 即立体校正。校正结果如图 3 所示。



(a) 立体校正前左右图像



(b) 立体校正后左右图像

图 3 立体校正图

2 特征点提取

2.1 工件引磁片的特征点提取

本文采用图像金字塔分层搜索策略与带缩放的亚像素精度模板匹配算法进行目标引磁片特征点的提取，对缩放、混乱背景、部分遮挡、光照不均匀和对比度全局反转等情况具有很好地鲁棒性，有效地提高了特征点提取的精度与速度。该算法在 Sobel 算子滤波得到边缘点方向向量的基础上定义相似性度量函数，同时结合图像金字塔分层搜索策略，利用引磁片图像边缘的形状信息进行模板匹配。基于形状模板匹配算法的相似性度量 s 为：

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^T e_{q+p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i v_{r+r_i, c+c_i} + u_i w_{r+r_i, c+c_i} \quad (2)$$

其中： d 表示模板图像中点的梯度向量， e 表示搜索图像中对应点的梯度向量。

归一化后的相似度量 s ：

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{d_i^T e_{q+p}}{\|d_i\| \|e_{q+p}\|} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t_i v_{r+r_i, c+c_i} + u_i w_{r+r_i, c+c_i}}{\sqrt{t_i^2 + u_i^2} \sqrt{v_{r+r_i, c+c_i}^2 + w_{r+r_i, c+c_i}^2}} \quad (3)$$

由于对模板中点的梯度向量进行了归一化，相似度量 s 将返回一个小于等于 1 的值，当 $s = 1$ 时，说明模板与图像一一对应。为进一步提高算法的实时性，采用金字塔分层搜索策略可以减小搜索的位姿数量以及模板中点的数量以提高运算速度，在金字塔最底层得到的像素级定位精度，并利用最小二乘平差进行微调，获得亚像素级定位精度和尺度缩放精度。具体地，在每层图像上与创建的模板图像进行相同的图像处理过程，包括图像滤波、边缘检测和边缘细化，完成从金字塔顶层向下的逐层搜索，直至当相似度量 s 大于预设的阈值，便可以实现中心特征点的提取，也就是匹配模板的中心坐标。同时，将边缘提取到的亚像素边缘通过 Ramer^[11] 算法，对大量的亚像素边缘坐标数据按照直线和圆弧等基本几何元素进行分段以获取边缘特征点。工件的边缘与中心特征点提取结果如图 4 所示，十字标记处即为特征点。

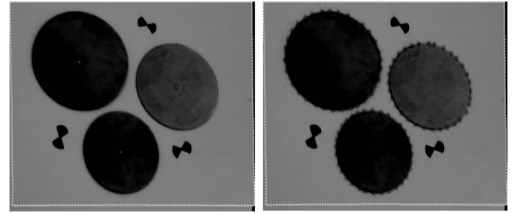


图 4 特征点提取

2.2 鞍点提取

鞍点 (Saddle point) 指在一个方向上是极大值，在另一个方向上是极小值。输入图像是由 x 和 y 的二次多项式近似，在输入图像中，计算其每一像素点分别在 x 、 y 方向的二阶偏导数，根据 Hessian 矩阵行列式^[12]的特征值来检测多项式的极值和鞍点，特征值对应于灰度值表面的曲率。如果 Hessian 矩阵的两个特征值都是小于零的，则检测该临界点处是一个局部极大值，如果两个特征值都是大于零的，则该点是局部最小值；如果它们具有不同的符号，则检测该临界点处是鞍点，也就是指在一个方向上是极大值，在另一个方向上是极小值。

基于 Hessian 矩阵行列式^[12]提取的鞍点进行构建向量，并运用构建的向量定义一个新的非正交的坐标系平面，坐标系平面由向量 P2P1 和 P2P0 定义，在非正交的坐标系中计算并确定该平面上的法向量。鞍点提取与非正交坐标系的构建如图 5 所示。

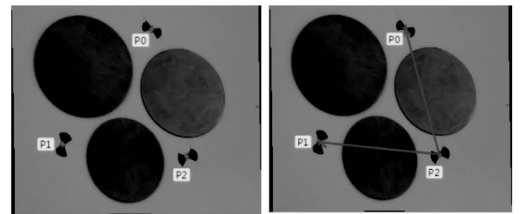


图 5 鞍点提取与坐标系构建

3 目标定位

3.1 立体匹配

立体匹配是双目视觉算法中最关键的一步，其主要工作是寻找不同观察角度下的同一空间物体中的同一点在不同图像中的对应关系^[13]。其搜索原理为：以左图像中像素点 P_L 为中心作为待匹配点，截取一个矩形子窗口；在右图像中，按照从上到下从左到右的原则，根据相似性度量准则搜索与待匹配点 P_L 灰度值最接近的窗口，并求出窗口的中心 P_R ，该点即为最佳匹配点，进而可以获取同一点在不同图像中的对应关系 (见图 6)。

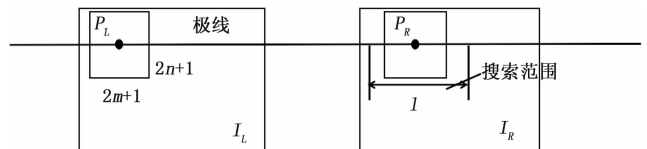


图 6 模板匹配原理图

由于左右摄像机的视角不同, 光照也会产生一定的差异, 所以需要一种不随光照变化而变化的方法, 本文采用极线约束准则与 NCC^[7] 相结合的灰度相关区域匹配算法快速完成特征点的立体匹配。归一化互相关算法 NCC:

$$NCC(x, y, d) = \frac{1}{(2n+1)(2m+1)}$$

$$\left[\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m (I_L(x+i, y+j) - \overline{I_L(x, y)}) \right]$$

$$\left[I_R(x+i, y+j+d) - \overline{I_R(x, y+d)} \right] / \sqrt{d^2(I_L) \times d^2(I_R)} \quad (4)$$

其中: $\overline{I(x, y)} = \frac{\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m I(x+i, y+j)}{(2n+1)(2m+1)}$, $\delta(I) =$

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m I^2(x, y)}{(2n+1)(2m+1)} - I^2(x, y)}$$

$\overline{I(X, Y)}$, $\delta(I)$ 分别表示当前位置搜索点邻域中所有像素点的平均灰度值与方差。

3.2 三维重建与 3D 仿射变换

双目立体视觉系统的三维重建是通过两台摄像机同时获取场景的两幅图像, 找到空间同一点在两幅图像中的匹配点对, 结合双目视觉成像原理可求出该点的三维坐标^[14]。获得的三维点云图以及截取的部分三维点 X、Y、Z 坐标信息如图 7 所示。

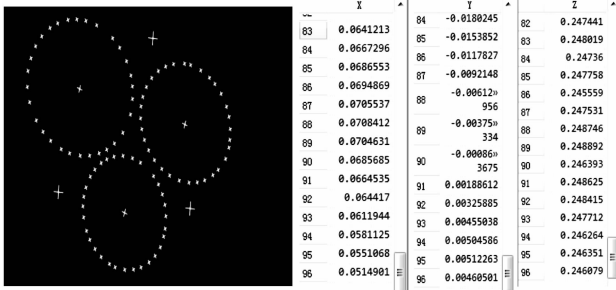


图 7 三维重建结果

为了提高评估工件定位系统的精度, 需要对重建得到的三维点云坐标进行 3D 仿射变换, 将其转换成以左摄像机

为参考坐标系下的世界坐标。根据 3D 仿射变换原理

$$\begin{pmatrix} Q_z \\ Q_y \\ Q_x \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_z \\ P_y \\ P_x \\ 1 \end{pmatrix} = (R \cdot \begin{pmatrix} P_z \\ P_y \\ P_x \\ 1 \end{pmatrix} + T)$$

创建仿射变换矩阵, 设输入点为 (P_x, P_y, P_z) , 转换成以左摄像机为参考坐标系下的世界坐标, 并将得到的点返回到 (Q_x, Q_y, Q_z) 。

4 实验结果与分析

为进一步测量工件引磁片的尺寸, 利用空间曲线拟合公式 $l = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$, 对每个边缘点与相应的工件引磁片中心进行计算并通过取平均值的方法完成半径的测量。通过 2.2 中建立的非正交平面坐标系与法向量的计算, 进一步构建向量 R1P0、R2P0 和 R3P0, 并将其分别投影到计算的法向量上, 即利用点积运算完成超薄引磁片的厚度测量。选定上述各步骤算法的参数后进行三维定位与测量, 并分别计算三个工件的测量数据与实际数据之间的误差, 得到 3 组引磁片立体图像对的测量数据如表 1 所示。其中前两组图像对的测量数据结果如图 8 所示。

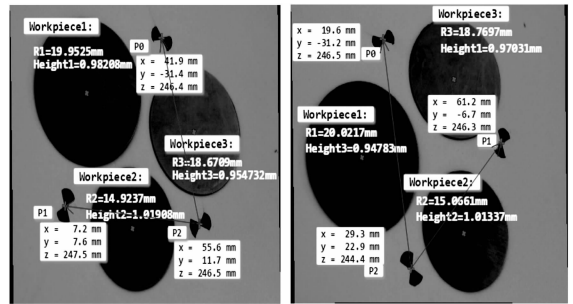


图 8 三维空间信息与测量结果图

结果如表 1 所示, 测得引磁片的实际半径误差小于 0.1 mm, 误差率小于 1%; 实际厚度误差小于 0.1 mm, 误差率小于 6%。结果表明, 本文方法可有效获取工件引磁片特征点的 3D 坐标, 精度较高, 验证了一定条件下该方法具有较好的准确性和实时性。

表 1 测量结果与实际结果比较

工件组号-序号	测量半径 R/mm	实际半径 R/mm	误差/mm	误差/%	测量厚度 H/mm	实际厚度 H/mm	误差/mm	误差率/%
1-1	19.9525	20.00	0.0475	0.24	0.9821	1.00	0.0179	1.79
1-2	14.9237	15.00	0.0763	0.51	1.0191	1.00	0.0191	1.91
1-3	18.6709	18.75	0.0791	0.42	0.9547	1.00	0.0353	4.53
2-1	20.0217	20.00	0.0217	0.11	0.9703	1.00	0.0297	2.97
2-2	15.0661	15.00	0.0661	0.44	1.0134	1.00	0.0134	1.34
2-3	18.7697	18.75	0.0197	0.11	0.9478	1.00	0.0522	5.22
3-1	19.9097	20.00	0.0903	0.45	0.9641	1.00	0.0359	1.59
3-2	15.0459	15.00	0.0459	0.31	1.0290	1.00	0.0290	2.90
3-3	18.6726	18.75	0.0774	0.41	0.9409	1.00	0.0591	5.91