

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905368

基于机器视觉的 3D 激光平面度测量系统的研究与应用*

谭 文¹, 方 森¹, 段 峰², 周博文¹, 吴亮红¹

(1. 湖南科技大学信息与电气工程学院 湘潭 411201; 2. 广东嘉铭智能科技有限公司 广州 510600)

摘 要:为了满足现代工业非接触、高精度以及快速对微型物体进行平面度测量的需求,本文采用 3D 激光测量方法研制了基于机器视觉的 3D 激光平面度测量系统。首先研究 3D 激光轮廓仪的扫描测量原理及平面度测量原理,然后对激光线图像进行预处理,确保后期测量的准确性,其次对几何特征进行定位和坐标转换,再进行数据处理,获取物体测量部位的三维测量值。本系统为微型物体几何尺寸的三维非接触、高精度、多尺寸测量提供了测量装置系统和相应的测量手段。最后实物测量实验验证文中测量方法的准确性、快速性和有效性,测量精度可达 $0.1\ \mu\text{m}$ 。

关键词: 3D 激光;高精密度测量;图像预处理;机器视觉;特征定位

中图分类号: TN206 TH124 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.20

Research and application of 3D laser flatness measurement system based on machine vision

Tan Wen¹, Fang Miao¹, Duan Feng², Zhou Bowen¹, Wu Lianghong¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Guangdong Jiaming Intelligent Technology Co., Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: Non-contact, high precision and rapid flatness measurement of miniature objects is required in the modern industry. In this study, the 3D laser flatness measurement system based on machine vision is developed by the 3D laser measurement method. Firstly, the scanning measurement principle and the flatness measurement principle of the 3D laser profilometer are studied. The laser line image is preprocessed to enhance the accuracy of the later measurement. Secondly, the geometric feature is positioned and coordinate transformed. The data are processed again to acquire the three-dimensional measurement of the object. The system provides a measuring device and method for three-dimensional non-contact, high-precision, and multi-dimensional measurement of micro-object geometry. Finally, the physical measurement experiments verify that the realized system has the advantages of accuracy, rapidity and effectiveness. The measurement accuracy can reach $0.1\ \mu\text{m}$.

Keywords: 3D laser; high precision measurement; image preprocessing; machine vision; feature positioning

0 引 言

随着电子工业的飞跃发展,电子行业竞争愈加激烈,加速了产品的更新换代,制造精度要求日益提升,快速精确获取微型电子产品的外观和尺寸数据成为目前测量领域重要的研究内容之一^[1]。现代制造业中亟待解决的难题是如何准确、快速地获取微型产品三维表面数据,尤其是不规则形状的尺寸或曲面等三维测量^[2]。本文从

USB-C 转换接头的针脚平面度测量出发,当针脚平面度误差超过限定范围将造成短路或开路故障,影响工件功能,而在急需大量订单的情况下,生产厂商必须研发出具有智能视觉检测系统的生产线,解决手工线效率低、出错率高以及光学影像测量仪(optical gaging products, OGP)速度慢,不适用于大规模生产等问题。近年来,随着光纤激光器技术的不断发展,由于 3D 激光扫描^[3]是以获取被测物体轮廓数据为目的的一种成像技术,与一般 CCD 成像相比,三维激光扫描获取的图像纹理丰富、分辨率

高、具有更好的深度和范围信息,能更好地满足微小产品的视觉检测需求,故在工业应用和基础科学研究中被广泛使用,对微小产品平面度测量技术的研究就显得尤为重要,成为近年来机器视觉研究领域中的热点^[4]。

早期的测量工具和仪器大多数以接触产品表面为主,其中三坐标测量机^[5]作为典型的接触式三维重建测量工具,是目前工业生产中最常用的三维测量设备,由于它受多自由度转轴和复杂连杆的影响,因此测量精度往往受到限制。以电容式、电感式测微仪和光栅尺位移传感器为主要代表的测量仪利用机械传感技术和模拟电路技术通过探针来获取产品表面数据,因该类测量方法通常被用于测量待测产品中特定采样点的高度,容易导致测量低效率。概括地说,接触式测量存在如下缺点:1) 被测物形体影响,测量范围有限;2) 探头接触待测物,容易损害被测物表面或功能;3) 测量速度慢,效率低。

随着我国机器视觉技术的不断发展,此技术已经开始应用于电子工业生产之中。目前国内外较为常用的方法有全息干涉法^[6]、双目视觉法^[7]、光谱共焦技术^[8]等。全息干涉法使用全息照相术,将沿同一光路获取产品形变前和形变后的两个光波波阵面间的相互干涉显示出来,通过干涉条纹图来得到物体的轮廓信息,有较高的检测灵敏度和精度,缺点是数据处理复杂,容易导致效率低,另外底片的精确复位比较困难,不能测量振动相位。双目视觉法模拟人类视觉原理来获取物体的三维数据,系统结构简单、成本低,但相机基线限制了测量范围,计算复杂度高,测量精度不够高。光谱共焦技术通过测量反射光的波长得到被测物体到透镜的精确距离,光路非常紧凑和集中,使其非常适合测量钻孔结构,测量精度高,可达纳米级,因此只能做到点测量、小量程,很难做到多尺寸、大量程、同步同时以及批量测量^[9]。

针对目前测量方法精度低、量程小、速度慢等问题,本文利用激光光线宽细、反应速度快、精度高的优点,结合改进的 Sobel 算子边缘特征提取与图像预处理等方法,研制了基于 3D 激光的视觉平面度测量系统,通过视觉测量技术获取产品的实际值,实现高速度、高精度、非接触、多尺寸的微型产品三维精密测量。

1 测量系统设计

如图 1 所示,视觉测量系统包括 3 个主要模块:基于激光的视觉传感器模块,图像处理模块和多个轴运动控制模块。视觉传感器安装在多轴线性定位系统的垂直轴,工作台沿 Y 方向移动(扫描方向)使视觉传感器扫描整个工件表面。整个 3D 轮廓高度信息由图像处理模块重建如下。

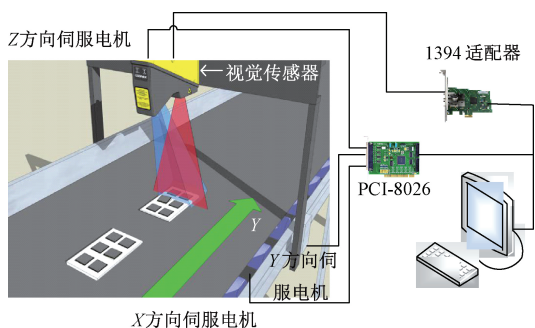


图1 系统结构

Fig.1 System structure diagram

机器视觉系统包括相机、镜头、光源、传感器、图像采集卡、PC 平台、视觉处理软件和控制单元。首先工业相机的光学单元对被测物进行摄像,将光信号转变为电信号,再经过图像采集卡转化为数字信号,以供 PC 端的数字图像系统进行处理,最后发出运算结果给控制单元来控制机器的动作。本研究中,作为一个标准而灵活的现成开发平台, Visionpro 用于开发图像处理模块, Visual Studio 用于开发多轴运动控制模块以及用户界面。采用火线 1394 适配器捕捉帧, NI 4 轴运动控制器 PCI-8026 用于控制三者伺服电机。

2 基于激光的视觉传感器的设计

3D 激光轮廓仪采用三角测量原理^[10]如图 2 所示,由扫描仪中半导体激光器经聚光透镜将一条激光光束照射在被测工件表面,形成一个光斑,把工件轮廓照亮,而在与激光器成某角度的另一端用相机采集轮廓线,被测工件随着机械上下位置移动,通过相机连续拍照采集,获得一系列轮廓线图像。为了直观地对图像进行处理,相机必须带有彩色摄像功能,使不同高度以不同颜色表示,利用颜色匹配技术根据运行时图像的颜色与参考颜色之间的距离,生成匹配分数^[11]。该方法用式(1)描述。

$$Color\ distance = \sqrt{\sum w_i (runtime_color_i - reference_color_i)^2} \quad (1)$$

式中: w_i 表示第 i 成分颜色的权重。颜色距离如图 3 所示,彩色原理图如图 4 所示,其中:

$$C_i = aR + bG + cB \quad (2)$$

式中: $a, b, c \geq 0$, 为 3 种原色的权值或者比例; R, G, B 为三原色, $0 \leq R, G, B \leq 255$ 。

图 5 所示为激光轮廓仪采集后的彩色立体图形。根据 GB/T 11337-2004^[12]对平面度的定义,本文将两侧的黄色区域设为参考平面 W , 分别测量中间 4 个针脚顶部黄色区域平面 W_1 与参考平面的平面度。

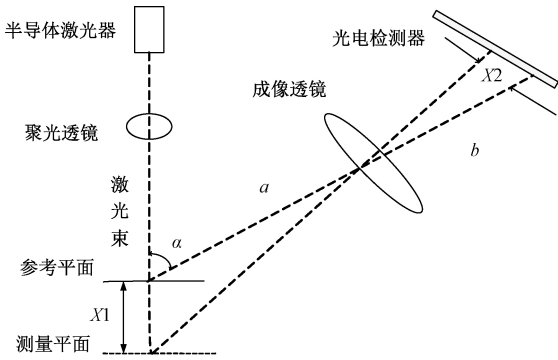


图 2 激光三角法测量原理

Fig.2 Laser triangulation measurement principle

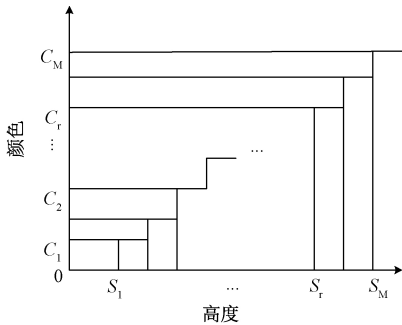


图 3 参考颜色匹配

Fig.3 Diagram of reference color matching

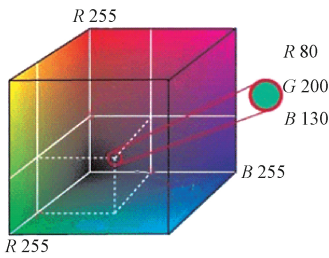


图 4 彩色原理图

Fig.4 Color schematic

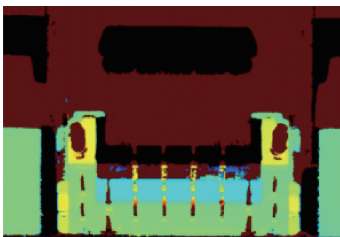


图 5 工件 USB-C 立体图

Fig.5 Workpiece USB-C perspective

与检验物体平面度以及垂直度的水平仪不同的是,激光轮廓仪测量的每一组数据为相应测量点的坐标值,要想计算出理论的基准平面就必须对测量点数据进行拟合。假设参考平面 W 的平面方程为:

$$Ax + By + Cz - 1 = 0 \quad (3)$$

式中: (A, B, C) 为平面的法向量。将测得的坐标点 (x_i, y_i, z_i) 根据最小二乘法,代入标准平面方程,可获得如式(4)所示的残差方程:

$$V = B\hat{x} - l \quad (4)$$

$$\text{式中: } B = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & z_i \end{bmatrix}, l = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}。$$

最小二乘法要求: $V^T P V = \min$, 由于测量点的权重相同,因此取 P 为单位矩阵,可得:

$$\hat{x} = (B^T P B)^{-1} B^T P l \quad (5)$$

即 $(a, b, c)^T = \hat{x}$ 。求得最佳拟合平面方程。根据得到的平面方程,可计算出各个测量点到平面的距离。

$$d_i = \frac{ax_i + by_i + cz_i - 1}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (6)$$

平面度即为 $d_{\max} - d_{\min}$ 。

3 图像预处理及视觉检测算法

3.1 图像预处理

1) 像素地图化

像素地图化是将输入图像的像素值(如来自 DS 系列传感器 Image16Range 图像)映射到输出图像(Image8Grey)的最简单方法。相机获取输入图像后,像素地图化根据直方图数据自动生成映射,以增强图像的视觉特征。将 16 位图像缩小为 8 位图像,同时选择性地保留特定范围的像素值。自大多数通过选择性地扩展感兴趣特征的像素值范围,增加具有低对比度的图像特征的可见性,增强 X 射线和热图像中缺陷的可视化。创建复合像素映射函数,将不同的线性映射应用于不同的输入像素值范围,从 3D 剖面摄像机(如 DS 系列位移传感器)中选择性地过滤特定高度范围。

像素地图化的工作原理是根据输入图像的直方图数据创建两个参考点(或一系列参考点)。如表 1 和图 6 所示,第 1 个点标识为(Input1, Output1),第 2 个点标识为(Input2, Output2)。Output1(也称为第 1 个映射值)可用于默认映射不可见像素,本文添加 Point 0 ~ Point 3,以反映输入图像到全范围输出图像的全范围映射,而对于 Image16Rang 不可见像素值可以自动映射到 Output1。

如图 7 所示,每个参考点定义单个输入像素值到单个输出像素值的映射,像素地图化在每对参考点之间创建像素值的线性映射,线性映射的结果集形成映射函数。小于最低参考点的所有输入像素值被映射到由参考点定义的输出值。所有大于最高参考点的输入像素值都映射

表 1 映射参考点数据

Table 1 The data of reference points map

点	相对输入	相对输出	绝对输入	绝对输出
0	0	0	0	0
1	0.355 972	0	23 329	0
2	0.373 337	1	24 467	256
3	1	1	65 536	256

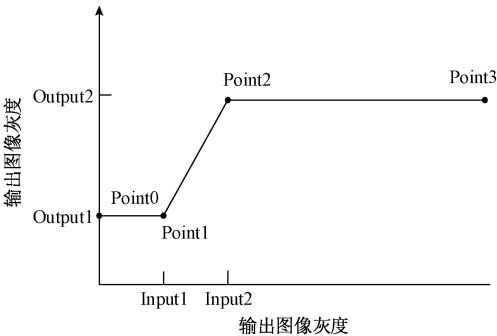


图 6 映射参考点的创建图

Fig.6 Creating a map of reference points

到参考点定义的输出值。如果指定单个映射点,则所有输入像素值都映射到单个输出像素值。如果未定义映射点,则使用单个线性映射来映射像素。图 8 所示显示了如何使用参考点来定义映射函数。

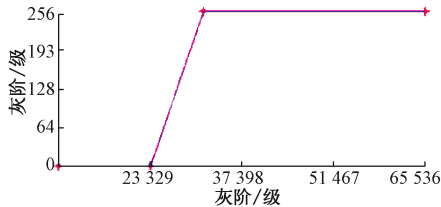


图 7 参考点及其图像位置

Fig.7 Reference point and its image position

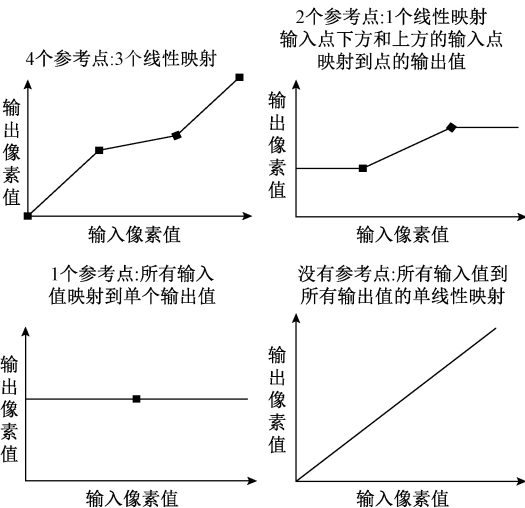


图 8 参考点和相应的映射

Fig.8 Reference point and corresponding mapping

将像素值从 16 位图像简单线性映射到 8 位图像意味着 8 位输出图像中的每个像素值对应于 16 位输入图像中的 256 个像素值。输入图像中的像素值 0~255 在输出图像中被分配像素值 0,像素值 256~511 被分配给 1,以此类推。参考点以及效果图分别如表 2、图 9 和 10 所示。

表 2 映射参考点数据

Table 2 The data of reference points map

点	相对输入	相对输出	绝对输入	绝对输出
0	0	0	0	0
1	0.353 882	0	23 192	0
2	0.372 894	1	24 438	256
3	1	1	65 536	256

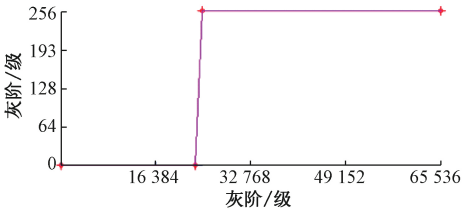


图 9 像素地图化预处理参考点及图像位置

Fig.9 Reference point and image position of pixel map preprocessing

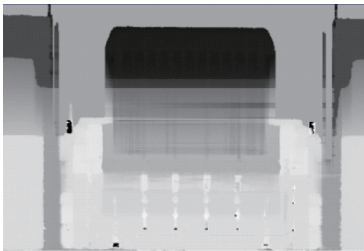


图 10 像素地图化效果

Fig.10 Pixel map rendering

2) 直方图均衡化

直方图是像素值的一维函数,其表示图像中像素值的分布。直方图均衡化的原理如下:定义 r 表示输入图像灰度, s 表示输出图像灰度,其范围分别是: $0 \leq r \leq 1$, $0 \leq s \leq 1$, 变换关系为 $s = T(r)$, 其中 r 在区间内单调递增, 且 $0 \leq T(r) \leq 1$, 则 $r = T^{-1}(s)$ ($0 \leq s \leq 1$), 如果输入图像灰阶的概率密度函数 $P_r(r)$ 和映射函数 $T(r)$ 已知, 且 $T^{-1}(s)$ 是单调递增函数, 结合概率论理论知识, 则变换后的图像灰度级的概率密度函数 $P_s(s)$ 如式 (7) 所示。

$$P_s(s) = P_r(r) \left. \frac{d_r}{d_s} \right|_{r=T^{-1}(s)} \quad (7)$$

当输入图像为连续图像时,经过直方图均衡化后, $P_s(s) = 1$,对两边积分得到式(8)。

$$s = T(r) = \int_0^r P_r(r) dr \quad (8)$$

直方图均衡化效果如图11所示。

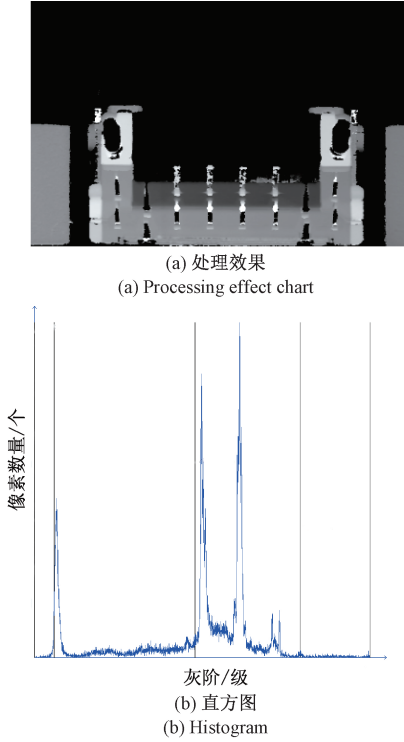


图11 直方图均衡化效果图

Fig.11 Histogram equalization effect diagram

3.2 视觉检测算法

为了矫正镜头畸变以及精确地得到世界坐标系中目标物体米制单位的坐标,首先要标定相机的外方位参数和内方位参数。其中外方位参数确定摄像机坐标系与世界坐标系之间的相对位置关系,如式(9)所示。内方位参数确定了相机从三维空间到二维图像的投影关系,如式(9)~(13)所示。

$$\mathbf{P}_c = \mathbf{R}\mathbf{P}_w = \mathbf{T} \quad (9)$$

$$\lambda d\tilde{u} = x_c - tv_x \quad (10)$$

$$\lambda d\tilde{v} = y_c - tv_y \quad (11)$$

$$\lambda f = z_c - tv_z \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} r \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t \\ \frac{\tilde{u}}{s_x} + c_x \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{P}_w$ 表示世界坐标系中坐标 $(x_w, y_w, z_w)^T$; $\mathbf{P}_c$ 为摄像机坐标系中坐标 $(x_c, y_c, z_c)^T$; $\mathbf{T} = (x_t, y_t, z_t)^T$ 是一个平移向量; $\mathbf{R} = R(\alpha, \beta, \gamma)^T$ 是一个旋转矩阵; λ 为比例系数;

$d = 1/[1 + k(\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2)]$,其中参数 k 表示径向畸变量级, $(\tilde{u}, \tilde{v})$ 为成像平面坐标系 (u, v) 镜头畸变产生的坐标; (r, c) 为图像坐标系坐标; $(v_x, v_y, v_z)^T$ 为线性扫描摄像机的运动状态; t 表示线性扫描时间; s_x 为图像传感器水平方向上相邻两像素之间的距离。

视觉检测算法流程如图12所示,当采集卡采集到图像后,计算机先对图像进行预处理,处理完成后使用预设的图像模板进行模板匹配,精确快速检测到被测目标,同时输出被测物的大致坐标。如果模板与待匹配图像无法完成匹配或者匹配系数小于某一阈值,判定这幅图像中的工件为不合格产品,如果匹配成功,则进行下一步的精确边缘定位和平面度测量。

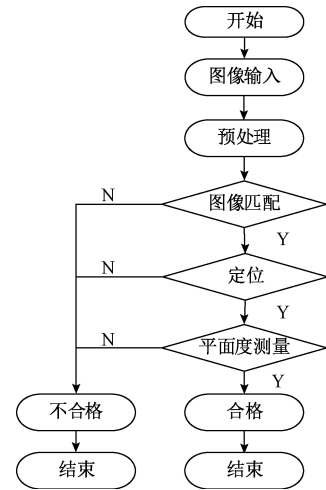


图12 视觉检测算法流程

Fig.12 Flowchart of visual inspection algorithm

1) 图像匹配

图像匹配是图像处理中不可或缺的基础技术之一,通过图像匹配技术能够快速寻找被测物体的大致位置,并输出其位置坐标,因此图像匹配技术对后期检测算法的实现有着举足轻重的意义。

当使用图像匹配时,机器视觉系统会在从获取的每幅图像中搜索事先建立的参考模板,同时计算出模板与待匹配图像之间的相似程度,即匹配系数。其本质是在基元相似性的状况下的最佳搜索问题,基于灰度的模板匹配算法简单,无需对匹配对象进行分割和特征提取,使用数学模型对匹配进行误差估计、相似程度判定。假定目标物的位姿用一个平移描述,指定一幅图像 $t(r, c)$ 及相应的感兴趣区域(region of interest, ROI) Q 为匹配模板,可以沿图像中所有点移动模板并在每个位置计算相似度 s 。模板中各点的灰度值用 $t(u, v)$ 表示,待匹配图像中相应位置的灰度值用 $f(r + u, c + v)$ 表示,则可得到式(14)。

$$s(r,c) = s\{t(u,v), f(r+u, c+v); (u,v) \in Q\} \tag{14}$$

绝对误差总和算法 (sum of absolute differences, SAD) 如式(15)所示,在光照稳定的情况下,匹配效果很好。

$$SAD(r,c) = \frac{1}{n} \sum_{(u,v) \in Q} [t(u,v) - f(r+u, c+v)] \tag{15}$$

其中 n 为感兴趣区域中点的数量,即 $n = |Q|$, 这种相似度的计算效率非常高,如果模板与图像相同时,相似度为 0,否则大于 0。

在机器视觉应用中,图像中工件的特定 ROI^[13] 是研究重点。然而,在工业生产实践中,由于机械装置等外部原因的影响,被测物在生产线上会发生不可避免的抖动,导致目标物不能出现在图像中的理论位置。所以每次相机采集到的图片,图像中的物体位置会或多或少发生偏移。对于精密测量系统而言,若能够直接定位图像中的特定区域,那么即使目标物发生相对偏移或旋转时,机器视觉仍能快速、准确地处理目标物的 ROI。为此,本文定义一个相对于模板图像中目标物的参考坐标系,只要图像中的目标物发生偏移、旋转等情况后,仍处于检测区域,在进行一系列图像处理期间,坐标系会相应的随着被测物一起移动,从而检测区域也会准确定位到正确位置,匹配成功就会显示坐标系。

根据实验要求,本文创建如图 13 所示的模板和待匹配图像,匹配结果如图 13(c) 所示。

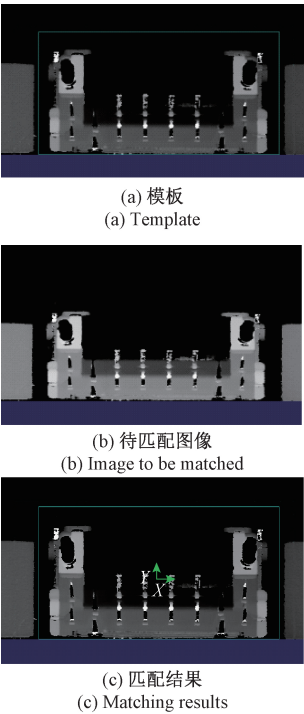


图 13 图像匹配

Fig.13 Image matching

2) 改进 Sobel 算子的边缘特征提取

图像测量是通过处理被测物体图像中的边缘而获得物体的几何参数的过程。因此,图像边缘提取方法是检测的基础和关键之一。在进行 USB-C 平面度检测之前,首先对工件图像边缘区域进行精确定位,这里先通过图像匹配输出的坐标系进行粗定位,然后再根据工件边缘特征来进行精确定位。

检测边缘的算法包括 Kirsch 算子、高斯-拉普拉斯算子和 Prewitt 算子等,而本文将采用 Sobel 算子,它利用像素邻域的梯度幅值来计算图像中每一点的梯度,同时求出梯度方向以及该方向的变化速率^[14]。给定像素的边缘幅度和边缘角度取决于 8 个周围像素的灰度值。图 14 所示显示了一个像素 E,它有 8 个邻居:

A	B	C
D	E	F
G	H	J

图 14 像素 E 邻居

Fig.14 Diagram of pixel E neighborhood

Sobel 算子计算 x 轴和 y 轴上像素 E 的边缘幅度如式(16)所示。

$$\begin{aligned} Magnitude_x &= ((C - A) + [2(F - D)] + (J - G))/4 \\ Magnitude_y &= ((G - A) + 2(H - B)) + (J - C))/4 \end{aligned} \tag{16}$$

式(16)用于测量单个的边缘幅度,而 Sobel Edge 算子使式(17)毕达哥拉斯定理计算像素的整体边缘幅度:

$$Magnitude_{edge} = \sqrt{Magnitude_x^2 + Magnitude_y^2} \tag{17}$$

此外, Sobel 算子计算边缘幅度角度如式(18)。

$$Angle_{edge} = \arctan \frac{Magnitude_y}{Magnitude_x} \tag{18}$$

边缘幅度图像是基于输入图像中的像素的边缘幅度的输出图像。与所有灰度图像一样,其中的像素具有 0~255 范围内的灰度值。然而,产生边缘幅度分数的上述公式可以产生大于 255 的值,最大值为 286。如果像素无法存储大于 255 的灰度值,则 Sobel 算子可能会丢失具有强边缘的输入图像的边缘信息,为此可用以下方法进行弥补。

(1) 设置适当的缩放因子

为了保留准确的边缘信息,本文引入幅度缩放因子。在将每个边缘幅度像素的灰度值添加到边缘幅度图像之前,必须将该灰度值乘以该缩放因子。为了精确反映边缘幅度图像中的所有边缘,为高对比度输入图像指定设置较低的缩放系数,本文使用 0.89 的缩放系数确保没有

像素值超过 255 的灰度级。

(2) 基于全像素峰值检测方法的 Sobel 算子

边缘幅度图像中的边缘可以跨越多个像素,具体取决于使用的相机类型或生产环境中的照明等因素。使用全像素峰值检测方法^[15],Sobel 算子可以生成具有更精确边缘信息的边缘幅度图像。如果像素具有比在图像内位于相同方向的两个相邻像素更大的幅度值,则全像素峰值检测方法将像素视为真边缘,并且将任何非边缘像素设置为 0。

此外,Sobel 算子可提供对峰值检测阈值的额外控制。在生成最终幅度图像时,该算子将删除灰度值低于阈值的任何像素。根据实际情况可将阈值设为 0 以防止算子移除任何像素,或者当知道图像中感兴趣的边缘具有高灰度值时,可以将其设置为更高的值。该方法增强了边缘幅度图像,使得真实边缘可以与误导性边缘像素隔离。

(3) 设置边缘滞后阈值

全像素峰值检测方法可以有效地改变边缘幅度图像,使得它们提供更精确的边缘信息,但是它不能消除表示原始图像中的视频噪声,光反射或其他缺陷的像素。由于任何图像中感兴趣的边缘通常由相邻像素的集合表示,所以使用边缘滞后阈值处理来消除非边缘像素。边缘滞后阈值创建一个图像,其中所有像素都具有边缘值或非边缘值,因此使用该过程的第一步是选择要表示边缘的灰度值以及要表示其他所有灰度值的值。第二步设计低阈值和高阈值来分析边缘幅度图像中的每个像素:边缘幅度大于或等于高阈值的所有像素将设置为指定的边缘值,而边缘幅度低于低阈值的所有像素将设置为指定的非边缘值。增加低阈值可以非常有效地消除非边缘像素,而将高阈值设置为大值将消除来自边缘幅度图像的除最强幅度值之外的所有幅度值。

图 15 所示为系统工件 4 个引脚中的一个引脚特征区域定位效果图。其中图 15 (a) 和 (c) 分别表示图 15(b) 和 (d) 检测结果对应的检测区域,图 15(e) 为整个工件特征提取结果。

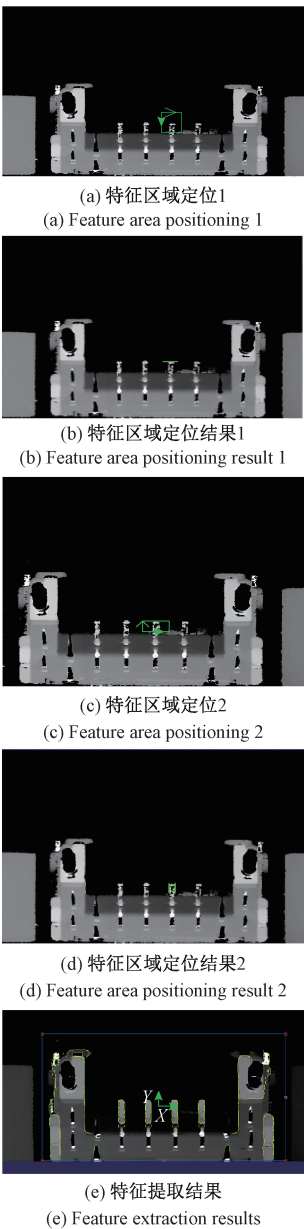


图 15 改进 Sobel 算子的边缘特征提取

Fig.15 Improved edge feature extraction of Sobel operators

4 平面选取与实验分析

第 3 节已经通过一系列图像算法检测到图像的特征区域,在使用开发设计平台进行实验前,特征区域中特征点的确定以及参考平面的选取关系到检测精度问题,因此显得尤为重要。本节首先将确定由特征区域内的特征点构成的特征平面,再确定参考平面,与此同时获取特征平面点数据与参考平面法向量的数据,最后通过实验测试并分析系统的可行性与准确性。

在确定特征边缘后,按照商家的要求,选取特征区域内的点为特征点,选取平面如图 16 所示。获取平面部

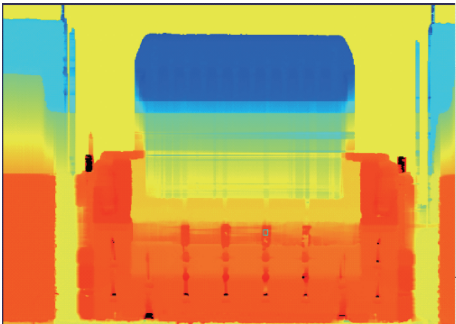


图 16 特征区域内的特征点

Fig.16 Feature points in the feature area

分特征点的数据如表 3 所示。

表 3 特征点部分数据

Table 3 Characteristic points of part data (mm)

X	Y	Z
-5.987 79	-5.223 53	-0.120 19
-6.219 16	-5.372 35	-1.462 61
-6.164 09	-7.424 22	-1.482 30
-6.168 89	-7.463 09	-1.466 16
-6.918 29	-6.101 06	-1.281 43
-6.791 18	-5.291 75	-1.234 21

在物理 3D 空间中,可以通过平面的法向量的方式描述平面,基于平面上的 3 个点(在右手坐标系中)计算由 3D 对象的表面定义的平面的法线,如图 17 所示。

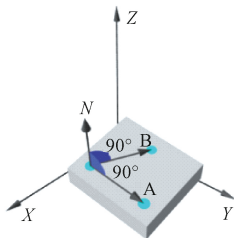


图 17 法向量示意图

Fig.17 Schematic diagram of the normal vector

通过归一化 N 向量来计算平面的法线。 N 向量计算为由平面上的 3 个点定义的两个向量的叉积。

$$N = A \times B$$

(19)

本文按照要求选取如图 18 所示的平面为参考平面,进行三维距离图像平面估计,得到平面的法向量为:(0.007 692 04,0.013 403 3,0.999 881)。

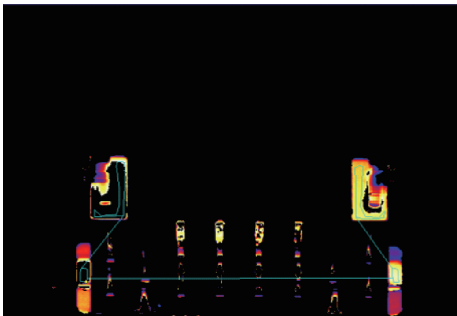


图 18 参考平面

Fig.18 Reference plane

根据以上结果,结合第 1 节对测量原理与视觉传感器的分析,获得如图 19 所示的结果,4 个针脚的平面度分别为-0.011 2,-0.011 1,0.002 00,-0.012 9 mm 满足客户要求,所以该产品为良品。

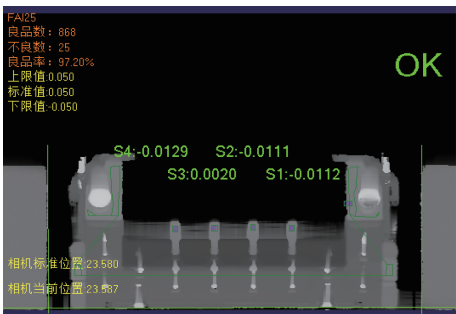


图 19 检测结果

Fig.19 Detection results

任何一台设备能否顺利交付客户使用,必须进行大量试验,表 4 所示为在线视觉检测系统连续 0.5 h 检测的数据统计,其中 OK 表示良品,NG 表示不良品。

表 4 检测系统数据统计

Table 4 Detection system data statistics

工位	检测总数	OK 数	NG 数	良率/%	不良率/%
左	2 167	2 128	39	98.20	1.80
右	2 173	2 133	40	98.16	1.84
总计	4 340	4 261	79	98.18	1.82

5 结 论

本文针对目前测量方法精度低、量程小、速度慢等问题,利用三维激光扫描获取的图像纹理丰富、分辨率高的优点,结合改进的 Sobel 算子边缘特征提取与图像预处理等方法,研制了 3D 激光平面度测量系统。实验结果说明该系统在 0.5 s 周期内对 USB-C 连接器平面度进行高精度准确测量,测量精度达到 0.000 1 mm。系统检测性能、稳定性能可以满足在线生产的需求,节约了大量的人力资本。同时该系统对以后高精度、高速度、高要求的机器视觉在线检测系统的研发具有很高的参考价值。

参考文献

[1] MOLL EDA J, USAMENTIAGA R, et al.Uncertainty propagation analysis in 3-D shape measurement using laser range finding [J]. IEEE Trans Instrum Meas,2012, 61(5): 1160-1172.

[2] 余乐文,战凯,张达.地下空间三维激光扫描等分辨率方法研究[J].仪器仪表学报,2018, 39 (1):68-74.

YU L W, ZHAN K, ZHANG D. Study on three-dimensional laser scanning and other resolution methods in underground space [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2018, 39 (1): 68-74.

[3] 丁少闻,张小虎,于起峰,等.非接触式三维重建测量方

- 法综述[J].激光与光电子学进展, 2017, 54(7):21-35.
- DING S W, ZHANG X H, YU Q F, et al. Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7):21-35.
- [4] 孙彬, 李兵. 一种量化的激光位移传感器倾角误差补偿模型[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5):996-1004.
- SUN B, LI B. A quantified laser displacement sensor tilt error compensation model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5):996-1004.
- [5] CAPPETTI N, NADDEO A, VILLECCO F. Fuzzy approach to measures correction on coordinate measuring machines: The case of hole-diameter verification [J]. Measurement, 2016, 93:41-47.
- [6] GHAREAB A I D, TAKESHI Y. High-precision 3D surface topography measurement using high-stable multi-wavelength digital holography referenced by an optical frequency comb[J]. Optics Letters, 2018, 43(8):1758.
- [7] SUN J, ZENG D. Three-dimensional infrared imaging method based on binocular stereo vision [J]. Optical Engineering, 2015, 54(10): 103111.
- [8] J W LI, F H CAI, et al. A portable confocal hyperspectral microscope without any scan or tube lens and its application in fluorescence and Raman spectral imaging, Optics Communications, 2017, 392:1-6,
- [9] MORDASOV M, SAVENKOV A, et al. Non-contact triangulation measurement of distances to mirror surfaces [J]. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2018, 54(1): 69-75.
- [10] YAO Y D, XUE B ZH, RADOVAN KOVACEVIC. A laser-based machine vision measurement system for laser forming [J]. Measurement, 2016, 82: 345-354.
- [11] 洪梓铭, 艾青松, 陈昆. 基于光纤激光的高精度三维视觉测量技术[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8):89-96.
- HONG Y M, AI Q S, CHEN K. High-precision 3D vision measurement technology based on fiber laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(8):89-96.
- [12] 单忠德, 张飞, 聂军刚, 等. 非接触式缸盖平面度误差检测方法研究与测量系统研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(20):1-7.
- SHAN ZH D, ZHANG F, NIE J G, et al. Study on the method and measurement system of non-contact cylinder head flatness error [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(20):1-7.
- [13] 周显恩, 王耀南, 朱青, 等. 基于机器视觉的瓶口缺陷检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(5):702-713.
- ZHOU X EN, WANG Y N, ZHU Q, et al. Study on bottle mouth defect detection method based on machine vision [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016, 30(5):702-713.
- [14] 李世雄, 曹广忠, 李庆, 等. 基于锚点的边缘检测优化算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11):9-16.
- LI SH X, CAO G ZH, LI Q, et al. Study on edge detection optimization algorithm based on anchor point[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2018, 32(11):9-16.
- [15] FANG L, XING L T, CUI ZH, et al. Multi-peak detection algorithm based on the Hilbert transform for optical FBG sensing [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45: 47-52.

作者简介



谭文(通信作者), 分别于2002年和2006年在湖南大学获得硕士和博士学位, 现为湖南科技大学教授, 主要研究方向为机器视觉与图像处理。

E-mail: 1549760311@qq.com

Tan Wen (Corresponding author) received his M. Sc. and Ph. D. degree both from Hunan University in 2002 and 2006, respectively. He is currently a professor at Hunan University of Science and Technology. His main research interests include machine vision and image processing.



段峰, 分别于2002年和2007年在湖南大学获得硕士和博士学位, 现为广东嘉铭智能科技有限公司高级工程师, 主要研究方向为机器视觉技术应用。

E-mail: df@kmsichina.com

Duan Feng received his M. Sc. and Ph. D. degree both from Hunan University in 2002 and 2007, respectively. He is currently a senior engineer at Guangdong Jiaming Intelligent Technology Co., Ltd., His main research interests include machine vision technology application.