

具重复特征的大物面自动视觉检测中的亚像素级拼接

宋昀岑^{1,2} 陈伟^{1,2} 叶玉堂¹ 刘娟秀¹ 黄柄权^{1,2} 郭涛^{1,2} 赵津^{1,2}

(¹ 电子科技大学现代光电测控及仪器实验室, 四川 成都 610054)
² 成都术有科技有限公司, 四川 成都 610054)

摘要 针对自动视觉检测系统中,难以获得具有重复纹理特征的大面积物体的高精度图像问题,提出了一种二维图像光栅的亚像素级定位拼接新方法。采用光栅尺记录物体的位置信息,引入圆盘格标定板对二维运动平台 X、Y 轴与相机 X、Y 轴之间的夹角进行准确标定,并建立基于全局物理直角坐标系的二维拼接模型完成图像的拼接。实验结果表明,该方法的标定重复精度可以达到 10^{-4} rad 量级,拼接的物理误差为 $8\ \mu\text{m}$,拼接精度比校正前提高了近 8 倍,比已见报道提高 1 倍以上。该方法已成功应用于导航卫星接收天线电路的在线检测设备,并可广泛推广至检测精度要求达到亚像素级的机器视觉自动化检测领域。

关键词 机器视觉;图像处理;亚像素图像拼接;重复纹理特征;光栅

中图分类号 O346 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0315002

Sub-Pixel Stitching Method for Large Object with Duplicate Texture of Automatic Visual Inspection

Song Yunceng^{1,2} Chen Wei^{1,2} Ye Yutang¹ Liu Juanxiu¹

Huang Binquan^{1,2} Guo Tao^{1,2} Zhao Jin^{1,2}

(¹ Modern Opto-Electronic Measurement and Instrument Laboratory, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)
² Chengdu Holdtecs Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract Focused on the problems that it's difficult to obtain high precision mosaic image of object having duplicate texture in the automatic visual inspection system, a new two-dimensional (2D) image mosaic method based on sub-pixel grating positioning is presented. The method uses grating to record positions of object and calibration plate to accurately calibrate angles of X and Y axes between platform and camera, and build a 2D stitching model based on global Cartesian coordinate system to complete image stitching. Experimental results show that the method's calibration repeatability reaches 10^{-4} rad order of magnitude, with average physical error of $8\ \mu\text{m}$, and stitching precision increases nearly 8 times than that of not correction, 2 times better than the method that has been reported. The method has been successfully used in the online automatic inspection equipment for ceramic substrate of navigation satellite's receiving antenna circuit. The research result can be widely applied in machine vision automated inspection fields that require sub-pixel level detection precision.

Key words machine vision; image processing; sub-pixel image stitching; duplicate texture; grating

OCIS codes 150.1488; 100.3020; 120.4630

1 引言

在高精度自动化视觉检测领域,对于集成电路、

液晶屏线路、光电码盘等具有重复纹理特征的大面积物体,检测精度往往要求达到微米级。由于视场

收稿日期: 2013-09-05; 收到修改稿日期: 2013-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(61205004)、粤港招标关键领域重点突破项目(w0510116, w0511206)

作者简介: 宋昀岑(1984—),男,博士研究生,主要从事机器视觉算法方面的研究。E-mail: songyuncen@163.com

导师简介: 叶玉堂(1946—),男,教授、博士生导师,主要从事光电测量与控制、红外技术方面的研究。

E-mail: ytye@uestc.edu.cn

和分辨率的相互制约,在有限像素的情况下,必须通过多次局部成像后拼接得到全景图来满足高分辨率的要求。因此,纹理特征重复图像的拼接精度是影响后续视觉检测精度的关键问题之一。

目前常用的图像拼接方法分为三大类:1) 基于图像特征的拼接,典型的有基于直接像素点^[1-3]和基于纹理特征^[4-11]的方法。这类方法对于纹理具有周期性重复特征的图像,容易产生局部特征的伪匹配,导致在全景图的拼接缝隙处出现周期性增多或缺少部分纹理的情况,从而造成拼接错误;2) 基于机械的拼接,如基于等距序列图像的快速拼接^[12],以及采用步进电机等距运动进行图像拼接,其拼接精度为 $20\ \mu\text{m}$ ^[13]。这类方法的拼接精度主要依赖于机械运动精度,要达到高精度的成本较高,而且拼接误差为像素级;3) 结合机械平台与图像的拼接,采用精密光栅尺进行一维方向图像拼接^[14]。这类方法的拼接误差即不依赖于图像特征,也不依赖于运动平台的精度,但已有报道均未考虑二维方向上多幅图像的拼接。

提出了一种二维图像光栅定位拼接方法,该方法不采用图像处理算法^[15]分析工件的纹理特征,而是利用光栅尺定位二维运动平台的坐标位置,通过标定二维运动平台 X 、 Y 轴与相机 X 、 Y 轴之间的夹角参数,补偿由于硬件平台安装所造成机械误差,校正运动平台坐标系。再基于光栅坐标与物理直角坐标之间的转换构建全局物理直角坐标系的二维拼接模型,最后完成 2×2 个 $3664\ \text{pixel} \times 2748\ \text{pixel}$ 大小图片的精确拼接,整体误差控制在 $0.8\ \text{pixel}$ 左右。该方法已成功应用于导航卫星接收天线电路的在线视觉检测系统中。

2 问题提出

图 1 为系统原理图,其中相机固定不动,通过平台在二维空间上的运动来采集多幅局部成像图。理想情况下,二维运动平台 X 、 Y 轴与相机 X 、 Y 轴应该是分别平行的,而且平台 X 轴和 Y 轴应该为直角关系。但是,由于安装误差的存在,二维平台的 X 、 Y 轴并不成绝对直角,且与相机 X 、 Y 轴之间分别存在夹角 θ 、 β ,从而导致相邻两小图在二维方向上均存在偏移,如图 2 所示。并且,由于光栅尺的分辨率换算为像素单位时达到亚像素级,而两小图的偏移量不是像素的整数倍,若通过简单的图像平移进行拼接,会导致拼接缝隙处像素的丢失。因此,需要建立一个全局物理坐标系,并基于此坐标系进行二维拼接。

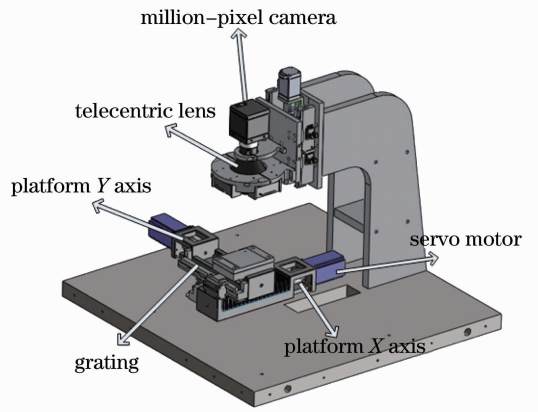


图 1 测试系统原理图

Fig. 1 Schematic of test system

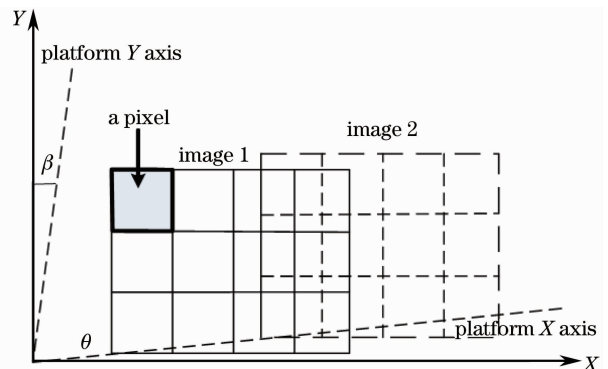


图 2 相邻两小图间的亚像素偏移

Fig. 2 Sub-pixel offset of two adjacent images

3 二维图像光栅定位拼接

3.1 运动平台的标定

对运动平台相关参数的准确标定是保证拼接精度的关键。标定^[16]的参数有:平台 X 、 Y 运动轴与相机 X 、 Y 轴的夹角 θ 、 β 和图像单个像素代表的物理尺寸 Δd 。

不失一般性,以标定运动平台 X 轴与相机 X 轴夹角 θ 为例,如图 3 所示,平台一开始处于位置 1,精度为 $4\ \mu\text{m}$ 的 5×5 圆盘格标定板置于平台上, X 轴光栅尺的读数为 d_1 。此时,相机采集一张图,提取标定板 25 个圆的轮廓,采用椭圆拟合的方式计算它们的亚像素圆心坐标 (x_{1i}, y_{1i}) , $i = 1, 2, \dots, 25$; 然后平台沿 X 轴运动到位置 2, X 轴光栅尺的读数变为 d_2 , 并保证圆盘格完整的出现在相机视场中,相机再次采集一张图,利用同样的方式计算 25 个圆的亚像素精度坐标 (x_{2i}, y_{2i}) 。计算前后两张图中对应圆的圆心坐标之差,得到 25 个向量 $\mathbf{r}_i = (x_{2i} - x_{1i}, y_{2i} - y_{1i})$, 计算每个向量与图像 X 轴的夹角 θ_i , 求取 25 个夹角的平均值 θ , 即可得到平台 X 轴与相机 X 轴的夹角。

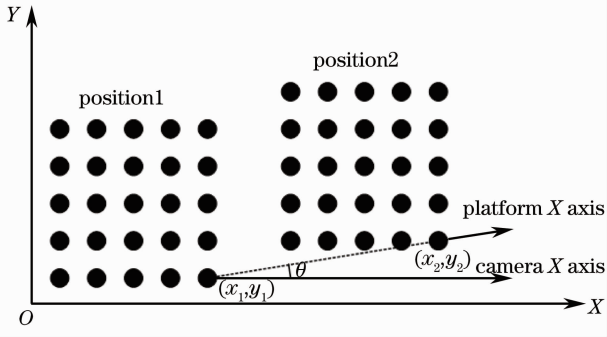


图3 X轴标定

Fig. 3 Calibration of X axis

由于二维运动平台的安装精度相对较高, 夹角 θ 实际上很小, 一般为 10^{-3} rad 量级, 假设图像单个像素代表物理尺寸 $\Delta d = 10 \mu\text{m}$, 那么夹角 θ 对 Δd 的影响为 $10 \times [1 - \cos(10^{-3})] = 5 \times 10^{-6} \mu\text{m}$, 可以忽略。计算 25 个向量 r_i 的长度, 再利用平台 X 轴移动的距离除以向量的平均长度, 得到 X 轴方向上图像单个像素代表的物理尺寸 Δd_1 :

$$\Delta d_1 = \frac{25 \times (d_2 - d_1)}{\|r_1\| + \|r_2\| + \dots + \|r_{25}\|}. \quad (1)$$

采用同样的方式, 标定平台 Y 轴与相机 Y 轴的夹角 β 以及 Y 轴方向上图像单个像素代表的物理尺寸 Δd_2 。最后取平均值得到最终的图像单个像素代表的物理尺寸为 $\Delta d = (\Delta d_1 + \Delta d_2)/2$ 。

3.2 全局光栅坐标系的建立

图 4 为二维运动平台的运动过程。运动平台处于原点 O , 然后平台沿 X 轴运动到位置 $A_1(x_1, y_1)$, 相机采集第一张图, 随后平台分别按照向量 A_1A_2 , A_2A_3 , A_3A_4 运动, 相机分别在位置 $A_2(x_2, y_2)$, $A_3(x_3, y_3)$, $A_4(x_4, y_4)$ 采集一张图。矩形 $A_iB_iC_iD_i$, $i = 1, 2, 3, 4$ 表示每张图覆盖的物理视场。

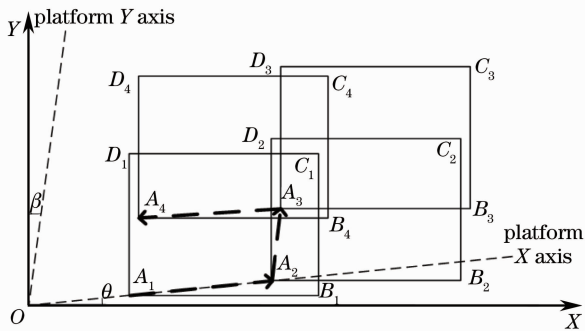


图4 二维平台运动过程

Fig. 4 Motion process of 2D platform

由于平台 X、Y 轴之间并非绝对的直角关系, 其形成的坐标系为仿射坐标系, 这样采集每幅小图时平台的坐标为仿射坐标系中的坐标。如果使用仿射

坐标系的坐标, 会导致后续计算异常繁琐, 为简化后续计算, 将采图时平台的光栅坐标转换到物理直角坐标系中。图 5 为相机采图时平台位置与物理直角坐标系的转换关系图。根据图 5, 建立 4 个采图位置 A_1, A_2, A_3, A_4 到标准物理直角坐标系的转换关系。以 A_1 的转换关系为例, $x_{A_1} = d_{OA_1} \cos \theta$, $y_{A_1} = d_{OA_1} \sin \theta$, 其中 d_{OA_1} 为 O 与 A_1 的距离。

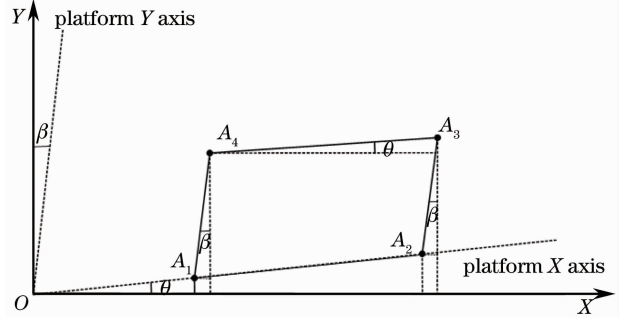


图5 平台光栅坐标与物理直角坐标转换关系

Fig. 5 Conversion between platform grating coordinate and cartesian coordinate

设相机的分辨率为 $w_0 \times h_0$, 利用图像单个像素代表的物理尺寸 Δd , 计算相机覆盖的物理视场大小, 确立 4 幅图像覆盖的矩形区域坐标, 不失一般性, 以第一幅图 $A_1B_1C_1D_1$ 为例, 该图覆盖的区域 4 个顶点的物理坐标

$$\begin{cases} x_{A_1} = d_{OA_1} \cos \theta, & y_{A_1} = d_{OA_1} \sin \theta, \\ x_{B_1} = x_{A_1} + W_0, & y_{B_1} = y_{A_1}, \\ x_{C_1} = x_{A_1} + W_0, & y_{C_1} = y_{A_1} + H_0, \\ x_{D_1} = x_{A_1}, & y_{D_1} = y_{A_1} + H_0, \end{cases} \quad (2)$$

式中 d_{OA_1} 为 O 与 A_1 的距离, $W_0 = \Delta d \times w_0$, $H_0 = \Delta d \times h_0$ 。

3.3 二维拼接

根据图 6 所示 4 张小图的区域物理坐标, 计算大图 4 个顶点 A, B, C, D 的物理坐标、大图的物理尺寸 $W \times H$ 、大图的中心物理坐标 $P(x_c, y_c)$, 大图的

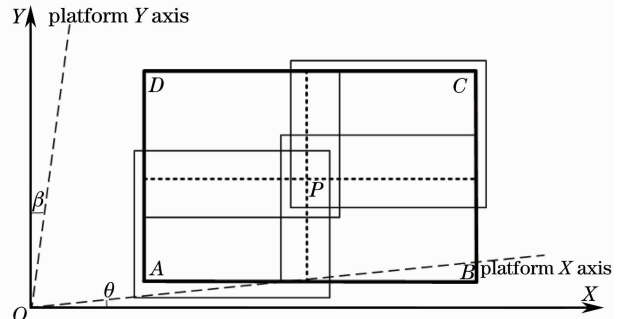


图6 目标图覆盖的区域及坐标

Fig. 6 Target image's coverage area and coordinates

像素尺寸 $W \times H$,

$$\begin{cases} w = [W/\Delta d] \\ h = [H/\Delta d] \end{cases} \quad (3)$$

二维拼接的具体过程, 是对于大图的某一像素 $p(i, j)$, 利用算法计算其位于具体的小图中的亚像素坐标位置, 最后插值计算 p 的灰度值。计算 $p(i, j)$ 灰度值的具体算法如下:

1) 计算 $p(i, j)$ 的物理坐标 $p(x, y)$ 为 $p(i \times \Delta d, j \times \Delta d)$ 。

2) 根据 $p(x, y)$ 落在以大图中心坐标 $P(x_c, y_c)$ 为中心的直角坐标系的象限, 确定 $p(x, y)$ 位于第 k 张小图中。

3) 使用小图采图位置 $A_k(x_{A_k}, y_{A_k})$, 计算 $p(x, y)$ 在小图局部坐标系中的坐标 $p(x', y')$ 为 $p(x - x_{A_k}, y - y_{A_k})$ 。

4) 计算 $p(x', y')$ 位于小图的亚像素坐标 $p(i', j')$ 。

5) 使用双线性插值, 计算 $p(i, j)$ 的灰度值。

通过该拼接方法计算大图的像素尺寸, 再将大图的像素索引到具体的小图中, 双线性插值得到像素灰度值。文献[14]中的一维光栅拼接方法利用简单的加权平均法完成重叠区域的图像融合, 而位于相邻两幅图像中的重叠区域在两幅图像中并不处在同一光照环境下, 物体的同一部分在相邻两幅图像中的灰度值并不是相同的, 采用简单的加权平均法会造成重叠部分的图像区域变得模糊, 势必会影响后续检测结果的准确性。步骤 2) 将大图的像素定位到具体的小图中, 特别对于大图的像素落在小图间有重叠的部分, 该拼接方法只会索引到唯一的一幅小图中, 不会索引到两幅小图中, 有效解决了小图之间的重叠问题。

4 实验结果与分析

4.1 实验测试系统

测试系统的原理图如图 1 所示, X、Y 轴主要由伺服电机和精密导轨组成。采用两套物理分辨率为 $1 \mu\text{m}$ 的英国 Renishaw 光栅尺分别记录 X、Y 轴的坐标位置。Z 轴上安装有微视 $3664 \text{ pixel} \times 2748 \text{ pixel}$ 的千万像素面阵相机, 并采用远心镜头减小图像畸变。

4.2 标定的重复精度

为了验证二维运动平台标定的重复精度, 对平台 X、Y 轴与相机 X、Y 轴的夹角 θ 、 β 和图像单个像素物理尺寸 Δd_1 、 Δd_2 分别标定 10 次。考虑到平台不

同位置的标定结果可能会存在差异, 在完成一次对 X 轴的标定后, 会让 Y 轴运动一段距离, 然后再对 X 轴进行下一次标定; 在完成一次对 Y 轴的标定后, 会让 X 轴移动一段距离, 再对 Y 轴进行下一次标定。标定结果如表 1 所示。可知, 平台 X 轴与图像 X 轴夹角 θ 的平均值为 0.008128 rad , 换算成角度单位为 0.4657° , 10 次标定结果中, θ 最大值为 0.0081876 rad , 最小值为 0.0080221 rad , 差值为 $1.66 \times 10^{-4} \text{ rad}$, 波动弧度很小; 平台 Y 轴与图像 Y 轴夹角 β 的平均值为 0.006769 rad , 换算成角度单位为 0.3878° , 10 次标定结果中, β 最大值为 0.0071345 rad , 最小值为 0.0065325 rad , 差值为 $6.02 \times 10^{-4} \text{ rad}$, 波动弧度也很小。表明所提标定方法的重复精度可以达到 10^{-4} rad 量级。夹角 θ 、 β 的不同, 也再一次证明了平台的 X 轴和 Y 轴并不成直角, 二者形成了一个仿射坐标系。

对于图像单个像素物理尺寸 Δd_1 、 Δd_2 的标定, 由标定结果可知, 对 X、Y 轴的总共 20 次标定中, Δd_1 的均值为 10.0534 , Δd_2 的均值为 10.0533 , 二者几乎完全一样。 Δd_1 与 Δd_2 的值波动范围小, 说明相机采用远心镜头后, 图像的畸变很小。

表 1 θ 、 β 、 Δd 标定结果

Table 1 Calibration results of θ , β , Δd

No.	Platform X axis		Platform Y axis	
	θ / rad	$\Delta d_1 / \mu\text{m}$	β / rad	$\Delta d_2 / \mu\text{m}$
1	0.0081435	10.0579	0.0067971	10.0535
2	0.0080221	10.0463	0.0066928	10.0712
3	0.0081642	10.0565	0.006542	10.0329
4	0.0081211	10.0437	0.0071091	10.0478
5	0.0081525	10.0395	0.0071345	10.0566
6	0.0080873	10.0599	0.0068318	10.0541
7	0.0081598	10.0576	0.0065325	10.0512
8	0.0081028	10.0387	0.0065897	10.0609
9	0.0081876	10.0667	0.0066612	10.0662
10	0.0081391	10.0676	0.0067998	10.0388
Average	0.008128	10.0534	0.006769	10.0533

4.3 图像的拼接精度

拼接前小图的大小为 $3664 \text{ pixel} \times 2748 \text{ pixel}$, 全景图尺寸为 $5631 \text{ pixel} \times 5320 \text{ pixel}$ 。为验证图像拼接精度, 对分辨率为 $2.4 \mu\text{m}$ 的高精度棋盘格标定片进行采集, 其图像拼接缝隙周围的局部图如图 7 所示。图 8 为不校正夹角的情况下, 拼接缝隙周围的局部图。对比图 7 和图 8 可知, 不校正平台夹角时, 拼接误差很大。为了量化拼接误差, 用 Harris 角点提取算法提取图中棋盘格的角点。为

减小 Harris 角点位置误差带来的影响,对于同一列上的角点,以拼接缝隙为界,拟合成两条直线,计算

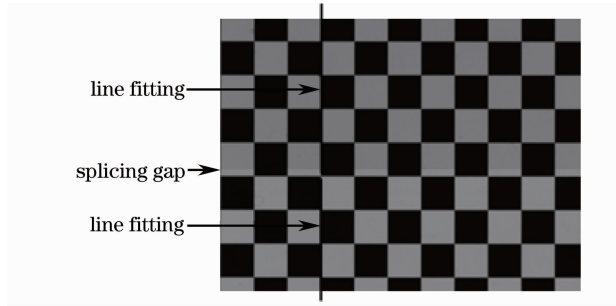


图7 校正夹角后图像

Fig. 7 Image after correction angle

两直线的距离作为小图像间的像素偏移量,最后求平均值得到整张拼接全景图的像素偏移量,结果如表2所示。

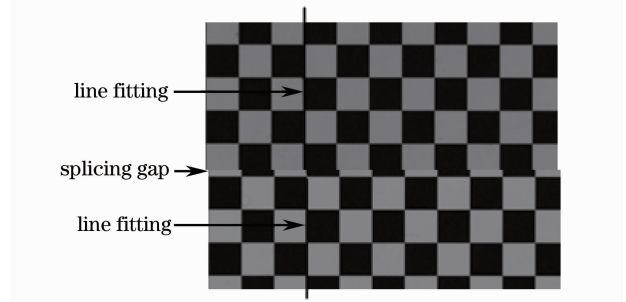


图8 校正夹角前图像

Fig. 8 Image before correction angle

表2 图像拼接偏移量结果

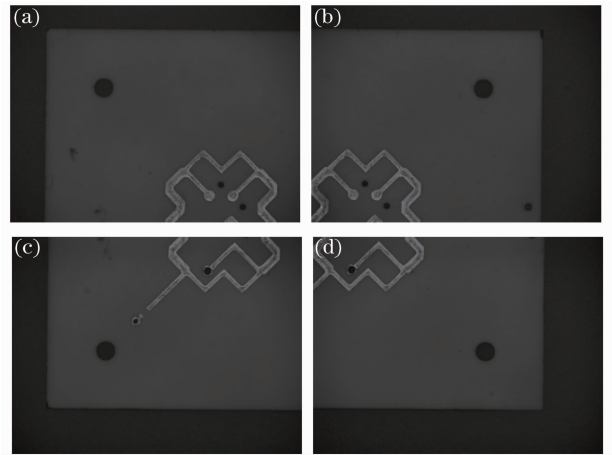
Table 2 Results of image mosaic offsets

No.	Image X axis				Image Y axis			
	Calibrate angle		Not calibrate angle		Calibrate angle		Not calibrate angle	
	Pixel offset /pixel	Physical offset / μm	Pixel offset /pixel	Physical offset / μm	Pixel offset /pixel	Physical offset / μm	Pixel offset /pixel	Physical offset / μm
1	0.83	8.34	6.21	62.43	0.81	8.14	4.98	50.07
2	0.75	7.54	5.78	58.10	0.77	7.74	5.87	59.01
3	0.82	8.24	7.19	72.28	0.79	7.94	4.92	49.46
4	0.88	8.84	5.32	53.48	0.84	8.45	5.11	51.37
5	0.77	7.74	6.10	61.33	0.75	7.54	4.77	47.95
Average	0.81	8.14	6.12	61.53	0.79	7.96	5.13	51.57

表2为图像拼接偏移量结果,物理偏移量为像素偏移量与图像单个像素代表的物理距离 Δd 的乘积。分析表中数据,拼接全景图中,像素平均偏移量为0.8 pixel,平均物理偏移量为 $8\mu\text{m}$,比文献[13]所报道的拼接精度提高一倍以上。若不标定平台XY轴与图像XY轴的夹角,大图的拼接误差在 $50\mu\text{m}$ 以上,校正夹角后,拼接精度在X轴方向上提高了近8倍,Y轴方向上提高了6倍。由于物理误差与相机的分辨率有关,如果采用更高分辨率的相机,使图像单个像素代表的物理距离更小,那么就可以获得更高精度的拼接效果。

4.4 本方法的应用实例

本方法成功应用在导航卫星接收天线电路线宽的在线检测系统上。对于大小为 $4\text{cm}\times 4\text{cm}$ 的陶瓷基片,该系统要求线宽的检测精度在 $50\mu\text{m}$ 。图9为拼接前相机采集到的小图,图9(a)~(d)分别为采图位置 A_1, A_2, A_3, A_4 采集到的图像。图10(a)为最终完成的电路拼接全景图,图10(b)为拼接处的局部放大图,十字虚线为虚拟的拼接缝隙处,电路拼接边缘不存在突变,满足系统的要求。

图9 4个采集点的小图。(a) A_1 ; (b) A_2 ; (c) A_3 ; (d) A_4 Fig. 9 Small images at four acquisition positions. (a) A_1 ; (b) A_2 ; (c) A_3 ; (d) A_4

5 结 论

针对纹理特征重复的二维图像拼接问题,提出了一种亚像素级精度的二维图像光栅定位拼接新方法,该方法优势体现在:拼接误差不依赖与物体的纹

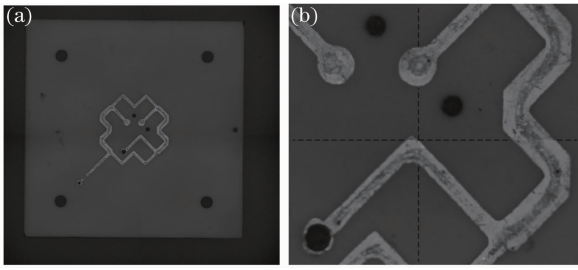


图 10 卫星接收天线拼接全景图。(a)全景图；
(b)拼接处局部放大图

Fig. 10 Mosaic image of receiving antenna of satellite.
(a) Ceramic substrate; (b) partial enlargement
of splicing gap

理特征；利用标定片标定二维运动平台 X 轴、 Y 轴与相机 X 轴、 Y 轴的夹角，可广泛用于矫正二维运动平台 X 轴、 Y 轴的垂直度；对于大图的像素落在小图间有重叠的部分，该拼接方法只会索引到唯一的一幅小图中，解决了拼接时小图之间的重叠问题。对于尺寸为 $5631 \text{ pixel} \times 5320 \text{ pixel}$ 的卫星接收天线拼接全景图，相对于未校正夹角情况，拼接像素误差由 6 pixel 减小为 0.8 pixel ，拼接物理误差由 $60 \mu\text{m}$ 减小为 $8 \mu\text{m}$ ，比文献[13]所报道的拼接精度提高一倍以上，大幅度提高了拼接精度。该方法不仅适用于 2×2 的拼接，还适用于其他任何情况的二维拼接，在高精度机器视觉自动化检测方面具有广泛的应用前景。但是该方法结合运动平台与图像完成拼接，需要使用光栅尺记录物体的位置，因此拼接精度依赖于光栅尺的分辨率，拼接精度越高要求的光栅尺分辨率也越高。

致谢 感谢罗颖博士对文章提出的宝贵意见。

参 考 文 献

- 1 Bruce Leblanc, N Christopher, A Peter, *et al.*. Topics in Modal Analysis II, Volume 6 [M]. New York: Springer, 2012, 277–284.
- 2 Chen Xiaowu, Li Qing, Li Xin, *et al.*. Video motion stitching using trajectory and position similarities [J]. Science China Information Sciences, 2012, 55(3): 600–614.

- 3 C Javier, Andrew J Davison, José Maria Martínez Montiel. Structure from Motion Using the Extended Kalman Filter [M]. Berlin: Springer, 2012, 13–31.
- 4 Zhaoxia Fu, Wang Liming. Optimized design of automatic image mosaic [J]. Multimedia Tools and Applications, 2013, 14(2): 1–12.
- 5 Zhou Ping, Luo Xiling. An efficient multi-view image stitching algorithm based on CSIFT features [J]. Future Communication, Computing, Control and Management, 2012, 142: 407–413.
- 6 S Samsudin, S Adwan, H Arof, *et al.*. Development of automated image stitching system for radiographic images [J]. Journal of Digital Imaging, 2013, 26(2): 361–370.
- 7 S M Heining, L Wang, N Navab. Clinical application of CAMC-long bone X-ray image stitching [J]. Medical Physics and Biomedical Engineering, 2009, 25(4): 2323–2325.
- 8 MyungHo Ju, Hang-Bong Kang. A new simple method to stitch images with lens distortion [J]. Advances in Visual Computing, 2010, 6454: 273–282.
- 9 Matthew Brown, David G Lowe. Automatic panoramic image stitching using invariant features [J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 74(1): 59–73.
- 10 Wu Xianxiang, Guo Baolong, Wang Juan. Cylindrical panoramic image automatic mosaic algorithm based on phase correlation [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1824–1829.
- 吴宪祥, 郭宝龙, 王娟. 基于相位相关的柱面全景图像自动拼接算法[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1824–1829.
- 11 Wang Huifeng, Liu Shangqian, Wang Dabao, *et al.*. Panoramic image mosaic method for rotary scanning serial image [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1211–1215.
- 王会峰, 刘上乾, 汪大宝, 等. 旋转扫描序列图像的全景图拼接方法[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1211–1215.
- 12 Fan Qingwen, Wang Xiaolong, Hou Li, *et al.*. Speeding mosaic technology based on isometry serial image [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2005, 37(1): 139–142.
- 樊庆文, 王小龙, 侯立, 等. 基于等距序列图像的快速拼接技术[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2005, 37(1): 139–142.
- 13 Xie Jiahao. Automatic Inspection System for PCB Based on Computer Vision [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004. 12–20.
- 谢佳豪. 基于计算机视觉的印刷电路板自动检测系统的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2004. 12–20.
- 14 Chen Shizhe, Hu Tao, Liu Guodong, *et al.*. Fast and precision image mosaic based on grating [J]. Optic Precision Engineering, 2006, 14(2): 242–246.
- 陈世哲, 胡桃, 刘国栋, 等. 基于光栅的快速精确图像拼接[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 242–246.
- 15 Huang Yonglin, Ye Yutang, Qiao Laosheng, *et al.*. Infrared image segmentation based on fast fuzzy C-means clustering [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1467–1470.
- 黄永林, 叶玉堂, 乔闹生, 等. 基于快速模糊 C 均值聚类算法的红外图像分割[J]. 强离子与激光束, 2011, 23(6): 1467–1470.
- 16 Li Weimin, Yu Qiaoyun, Liu Chao. Calibration method with separation pattern of a single-camera based on difference coordinates [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(5): 697–701.
- 李为民, 俞巧云, 刘超. 采用分离式差分标定靶的单摄像头标定方法[J]. 光学学报, 2006, 26(5): 697–701.

栏目编辑: 李志兰