

文章编号 1004-924X(2012)12-2821-09

## 机器视觉多视场协同测量方法

何博侠\*, 何 勇, 卜雄洙, 商 飞

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:**提出了机器视觉多视场协同测量方法以实现二维几何特征的现场高精度自动测量。介绍了该方法的基本原理,研究了实现多视场协同测量的关键技术。首先,建立测量空间,在大视场图像上识别被测特征并规划测量路径,建立大视场图像坐标与测量空间坐标之间的映射关系;根据测量路径,在测量空间中完成小视场序列图像的自动采集。然后,建立大视场图像坐标与小视场图像坐标之间以及相邻小视场图像坐标之间的映射关系,据此关系,在小视场图像的相应位置搜索并构建精细的辅助测量特征。最后,根据小视场序列图像在测量空间中的方位,求解各局部被测特征参数并进一步求和得到整体被测特征参数。应用该方法对  $\phi 150$  mm 圆盘上分布的 100 mm 孔距进行测量实验,结果表明,相对误差的绝对值不超过 0.03%。该方法测量精度不受机械坐标精度的影响,适用于在工业现场组建高精度自动测量系统。

**关键词:**机器视觉;多视场;协同测量;现场测量;自动测量

**中图分类号:**TP246;TH741 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122012.2821

## Cooperative measurement method of multi-FOV for machine vision

HE Bo-xia\*, HE Yong, BU Xiong-zhu, SHANG Fei

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of  
Science and Technology, Nanjing 210094, China)

\* Corresponding author, E-mail: heboxia@163.com

**Abstract:** A machine vision cooperative measurement method of multiple field of view (Multi-FOV) was proposed to realize the high-precision automatic measurement of two-dimensional geometric features. The basic principle of the method was introduced and the key technologies to realize the cooperative measurement were studied. Firstly, a measuring space was established, the features to be measured were identified, and an optimized measuring path was planned in a large FOV image. Then, the mapping relation between the image coordinate of the large FOV and the measuring space coordinate was established. Guided by the measuring path in the large FOV image and the control system, the sequential images with small FOVs were collected automatically in the measuring space. Furthermore, the mapping relation between the image coordinates of the large FOV and the small FOVs and that between the adjacent small FOV image coordinates were derived. On the basis of these relationships, exact auxiliary measurement characteristics in the corresponding locations in the small FOV images were researched and constructed. Finally, according to the orientations and positions of sequential small FOV images in the measuring space, the partial parameters were calculated and then further add them

**收稿日期:**2012-08-30;**修订日期:**2012-10-15.

**基金项目:**江苏省自然科学基金资助项目(No. BK2010481);教育部博士点基金资助项目(No. 20113219120004);国家博士后科学基金资助项目(No. 20100481148);江苏省博士后科学基金资助项目(No. 1001004)

to get the whole parameters of the measured features. Experimental results indicate that the absolute value of relative error is less than 0.03% when the method was used to gauge the distance of circular holes with the nominal dimension of 100 mm. The outstanding advantage of the cooperative measurement method of multi-FOV is that the measuring accuracy is not influenced by ambient temperature and the coordinate precision of machine. It is an effective method to automatically measure two-dimensional complex geometric characteristics of mechanical parts in industrial fields.

**Key words:** machine vision; multiple field of view; cooperative measurement; in situ measurement; automatic measurement

## 1 引言

机器视觉测量和检测技术作为一种新兴的测试计量技术,近十多年来得到了快速发展,一些以机器视觉二维几何尺寸测量技术为基础的影像测量设备和检测系统,已应用于微小结构测量、印刷电路板(PCB)检测、切削刀具磨损量在线监测、消费类电子产品的质量检验等工业自动化领域<sup>[1-3]</sup>。这类针对二维几何特征的机器视觉测量技术,依据测量范围和测量方法的不同,主要可分为五大类:利用显微成像的微尺寸视觉测量<sup>[4]</sup>,基于单幅图像的小尺寸视觉测量<sup>[5]</sup>,基于图像拼接技术的大尺寸测量<sup>[6]</sup>,基于序列局部图像尺寸特征的大尺寸测量<sup>[7]</sup>,与坐标测量系统集成的视觉测量<sup>[8]</sup>。检测尺度跨越了从微观到宏观的宽广范围。

上述五类技术中,第一、二类关于微小尺寸的测量在工业检测和在线应用方面取得了较大的成功<sup>[9-10]</sup>,这主要得益于测量范围比较小时,单幅图像就能以很高的分辨率对目标进行观测,从而获得较高的测量精度<sup>[11]</sup>。对于特征尺寸在 50~500 mm 甚至更大的零件,若要取得较高测量精度,就需要获得较大尺寸的高分辨率图像(即具有较高物面分辨率的图像)<sup>[12]</sup>,上述第三、四类利用图像拼接和特征提取的方法在此方面进行了有益的探索。然而,当需要拼接的高分辨率图像较多时,第三类方法难以适应要求快速测量的在线应用场合,另外,这种方法需要在被测零件上人为加入“点”或者“线”特征,这在现场自动测量环境下不便做到<sup>[13]</sup>。而第四类基于序列局部图像尺寸特征的测量方法只适用于直边零件和直线型几何特征的测量<sup>[14]</sup>,无法满足较复杂的非平行直线型几

何特征自动测量的需要。第五类方法实现了机器视觉系统与坐标测量系统的集成应用<sup>[8]</sup>。当前,基于这项技术的影像测量设备已形成一定的产业,在实践中取得了很好的效果<sup>[15]</sup>,但是,该方法的测量精度依赖于机械坐标精度,而高精度的机械系统使得整个测量系统结构复杂,制造成本高,对温度等测量环境的控制提出较高要求,使用成本高,难以用于在线自动测量。

综上所述,现有的二维几何特征的机器视觉测量技术,在面对先进制造现场的高精度、大量程、自动化、数字化测量要求时,主要面临以下三个问题:首先是如何协调测量分辨力和量程范围的矛盾来获得较高的相对测量精度;其次是如何提高测量的自动化和智能化水平,取得较高的测量效率;第三是如何使机器视觉测量技术在满足较高测量精度的同时,具有较好的现场环境适应能力,使之能应用于制造现场<sup>[16-17]</sup>。为此,本文提出一种机器视觉多视场协同测量方法,该方法通过把机器视觉微尺寸和小尺寸测量时具有的高精度特征引入大尺寸的测量,在满足高精度、大量程测量的同时,实现视觉测量的自动化,提高其工业现场适应性。

## 2 机器视觉多视场协同测量方法

基于序列局部图像尺寸特征的测量方法,在借鉴微小尺寸测量时的“小视场高精度”和拼接测量法的“由局部求整体”思想的基础上,提出采用“特征计算”取代“图像拼接”,很好地协调了测量分辨力和量程范围之间的矛盾,并使高精度在线测量成为可能。但是,该方法在构建各局部图像的尺寸特征时,需在相邻小视场序列图像的公共

区域构造公共尺寸线(称为“辅助测量特征”),为了降低辅助测量特征匹配的不确定性,现有研究对被测特征做了直线型假设<sup>[7,14]</sup>,这限制了该方法的适用范围。为了实现先进制造现场的高精度、大量程、自动化、数字化测量,有必要把基于序列局部图像尺寸特征的测量思想进一步拓展,寻求一种不限于直线特征的、比较通用的现场测量方法。

事实上,机电零件越复杂,在其表面上加工制造的各类几何元素便越多,即便是在不制造宏观几何元素的过渡区,小视场高分辨率图像也可以采集到零件表面丰富的细观信息<sup>[18]</sup>,这些几何元素和表面细观信息,可以用来构造辅助测量特征。但是,为了有效缩小小视场序列图像上辅助测量特征匹配时的搜索空间,增强特征匹配的确定性,特别是实现图像采集和处理过程的自动化,需要大视场全景图像信息的协同,以确定辅助测量特征在测量平面的方位,从而提高算法执行速度和测量速度,使其满足在线快速测量的要求。为此,作者提出机器视觉多视场协同测量方法,其基本原理如下:

(1)测量路径规划与小视场序列图像自动采集。建立如图 1 所示的三维测量空间  $O_M-XYZ$ ,设被测目标区域为  $F_0$ ,首先在  $O_1$  点对目标区域全局成像(图像为  $S_{11}$ )并标定,成像视场  $F_{11}$  略大于  $F_0$ 。然后根据测量要达到的精度要求,确定小视场图像的物面分辨率,结合相机本身的分辨率,即可计算出物距和小视场的大小。图 1 左右两图分别是小视场图像  $S_{2i}$  相对于大视场图像  $S_{11}$  的像面无旋转和有旋转时的示意图, $S_{2i}$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) 的采集平面是  $O_2$ 。上述参数确定后,在  $S_{11}$  上识别被测特征,并确定这些特征在测量空间中的(方位)坐标,结合被测特征形状及小视场大小,通过计算选择一条优化的测量路径。最后,根据确定的测量路径由控制系统引导完成小视场序列图像的自动采集,保存相邻小视场序列图像重叠区域的坐标信息,以便于后面构建细观同名特征时减小算法的搜索空间。

(2)被测特征参数提取。根据小视场序列图像采集参数和图像上几何特征的分布,建立大视

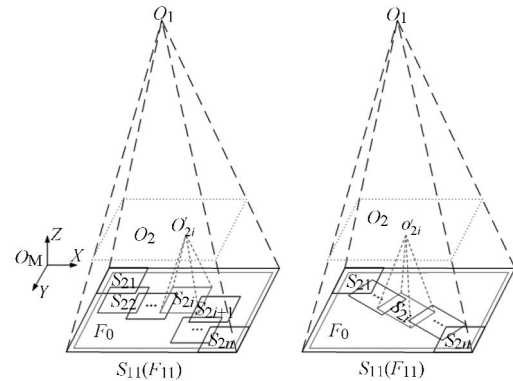


图 1 机器视觉多视场协同测量示意图

Fig. 1 Illustration of cooperative measurement method of multi-FOV for machine vision

场图像  $S_{11}$  的图像坐标与序列小视场图像  $S_{2i}$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) 的图像坐标之间的对应关系。在大视场测量路径的引导下,利用小视场序列图像上零件加工过程形成的自然细观特征,在序列小视场图像的重叠区域构建辅助测量特征并进行同名特征匹配。之后,在各小视场序列图像上,根据被测特征和辅助测量特征提取被测尺寸局部参数,并对局部误差进行估计与补偿。最后,根据小视场序列图像在测量空间中的方位,对各局部被测特征参数按方位进行计算并求和得到整体被测特征参数。

### 3 机器视觉多视场协同测量关键技术

实现多视场协同测量,首先要依据大视场图像上的测量路径,由控制系统引导小视场相机完成序列图像的自动采集,这需要建立大视场图像坐标与测量空间坐标之间的映射关系。其次,为了实现辅助测量特征的快速匹配,还需要建立大视场图像坐标与小视场图像坐标之间的映射关系、小视场图像的重叠区域在相邻小视场图像坐标之间的映射关系,本部分将研究建立上述 3 种关系。

#### 3.1 图像坐标与测量空间坐标的关系

如图 2 所示,建立测量空间坐标系  $O_M-XYZ$ ,它是整个测量活动所在的物理空间,设  $XO_MY$  面为被测目标所在平面,称  $O_M-XY$  为测量平面坐标系,相机光轴  $oo'$  始终与  $Z$  轴平行,调节相机成像点  $o$  在  $O_M-XYZ$  空间中的  $Z$  坐标值,

可得到大小不同的视场,调节  $o$  点的  $X$  坐标值或(和) $Y$  坐标值,可对测量平面不同区域成像。物面坐标系为  $o-xy$ ,用以确定成像视场在测量空间中的方位,与  $XO_M Y$  面在同一平面,原点  $o$  为相机光轴与测量平面的交点。图像坐标系为  $o_1-uv$ ,  $u$  轴表示图像特征点的横坐标,与物面坐标的  $x$  轴平行,  $v$  轴表示图像特征点的纵坐标,与物面坐标的  $y$  轴平行,坐标单位可以以像素(pixel)为单位(图像像素坐标系),也可以以浮点数为单位(图像数值坐标系)<sup>[14]</sup>。

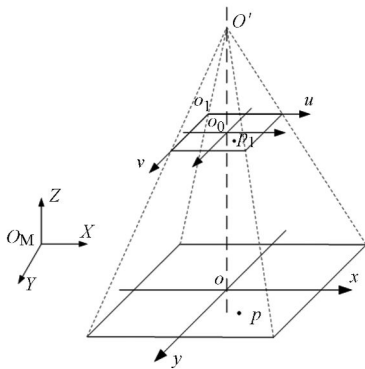


图 2 测量空间坐标系、物面坐标系与图像坐标系  
Fig. 2 Coordinate systems for measurement space, object plane and image

设点  $p$  为被测二维目标上的任一点,其在物面坐标系中的坐标为  $(x, y)$ ,在测量平面坐标系中的坐标为  $(X, Y)$ ,则存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$ ,  $\theta$  表示物面(像面)在测量平面上的旋转角度;  $\mathbf{T} = [X_o, Y_o]^T$  为二维平移向量,为物面坐标原点  $o$  在测量平面坐标系  $O_M XY$  中的坐标向量;  $\mathbf{0}^T = [0, 0]$ ;  $\mathbf{C}$  为坐标变换矩阵。

设测量系统标定后,物面坐标尺度在图像中的像素当量分别为  $\delta x$  和  $\delta y$ ,上述点  $p(x, y)$  在图像坐标系中的投影点为  $p_1(u, v)$ ,则下式成立:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_x & 0 & -u_o \delta_x \\ 0 & \delta_y & -v_o \delta_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中:  $(u_o, v_o)$  为物面坐标原点  $o$  在图像上的投影点  $o_o$  的图像坐标,亦即图像的中点。

将(2)式代入(1)式,得到测量平面上的点  $P(X, Y)$  与图像上的投影点之间的映射关系为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x & 0 & -u_o \delta_x \\ 0 & \delta_y & -v_o \delta_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{CQ} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{CQ}$  为  $3 \times 3$  可逆矩阵,因此,还可以得到

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{C}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\text{其中: } \mathbf{Q}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\delta_x} & 0 & u_o \\ 0 & \frac{1}{\delta_y} & v_o \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & -X_o \cos \theta - Y_o \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta & X_o \sin \theta - Y_o \cos \theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

可见,当已知  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$ 、 $\delta x$ 、 $\delta y$  时,(3)、(4)二式确立了图像坐标与测量空间坐标(对二维目标测量来说,不包含测量空间的  $Z$  坐标)之间的映射关系。

### 3.2 不同视场图像坐标之间的关系

设小视场  $F_{2i}$ , ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 的成像参数为  $\mathbf{R}_{2i}$ 、 $\mathbf{T}_{2i}$ 、 $\delta x_{2i}$ 、 $\delta y_{2i}$ ,则对于小视场图像  $S_{2i}$  上的某一点  $(u_{2i}, v_{2i})$ ,在测量平面上与之对应的特征点的坐标  $(X_{2i}, Y_{2i})$  为

$$\begin{bmatrix} X_{2i} \\ Y_{2i} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{2i} \mathbf{Q}_{2i} \begin{bmatrix} u_{2i} \\ v_{2i} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

当被测目标上的某一点在大、小视场中分别成像时,其测量平面坐标相等,从而,得到大视场图像坐标与小视场图像坐标之间的映射关系为

$$\begin{bmatrix} u_{11} \\ v_{11} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{Q}_{11}^{-1} \mathbf{C}_{11}^{-1} \mathbf{C}_{2i} \mathbf{Q}_{2i} \begin{bmatrix} u_{2i} \\ v_{2i} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

或者

$$\begin{bmatrix} u_{2i} \\ v_{2i} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{Q}_{2i}^{-1} \mathbf{C}_{2i}^{-1} \mathbf{C}_{11} \mathbf{Q}_{11} \begin{bmatrix} u_{11} \\ v_{11} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

设在小视场图像  $S_{2i}$  与  $S_{2i+1}$  的重叠区域构建

辅助测量特征  $l_{2i}$ ,  $l_{2i}$  上某点在  $S_{2i}$  的图像坐标为  $(u_{2i}, v_{2i})$ , 根据 (6) 式, 可得到其在大视场图像上的图像坐标为  $(u_{11}, v_{11})$ , 再根据 (7) 式, 便可得到其在大视场图像  $S_{2i+1}$  上对应匹配点的坐标  $(u_{2i+1}, v_{2i+1})$  为

$$\begin{bmatrix} u_{2i+1} \\ v_{2i+1} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{Q}_{2i+1}^{-1} \mathbf{C}_{2i+1}^{-1} \mathbf{C}_{2i} \mathbf{Q}_{2i} \begin{bmatrix} u_{2i} \\ v_{2i} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad i=1, 2, \dots, n-1, \quad (8)$$

这样, 在  $S_{2i}$  上构建辅助测量特征  $l_{2i}$  后, 依据 (8) 式, 便可计算同名特征在  $S_{2i+1}$  上的坐标位置, 同时考虑成像精度及测量环境的影响, 以计算得到的坐标值  $(u_{2i+1}, v_{2i+1})$  为中心, 适当扩大特征匹配的搜索范围, 选择适当的特征匹配方法<sup>[19]</sup>, 便可实现辅助测量特征的精确匹配。

### 4 实验与分析

图 3 所示为一底盘零件, 圆盘直径  $\phi 150$  mm, 盘上沿  $\phi 100$  mm 圆周均布有 6 个公称直径  $\phi 10$  mm 的圆孔  $O_1 \sim O_6$ , 用于定位 6 个小轴, 这 6 个孔具有位置度要求, 是零件上需要精密测控的特征。以孔距  $O_1 O_4$ 、 $O_2 O_5$ 、 $O_3 O_6$  的测量为例, 来说明多视场协同测量方法的应用。

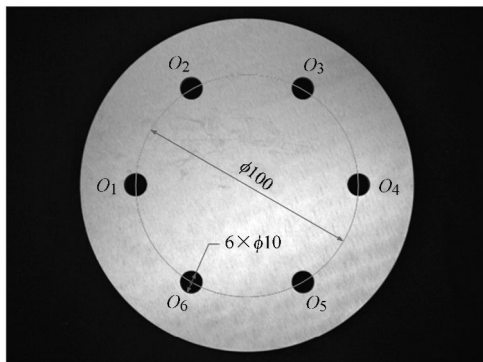
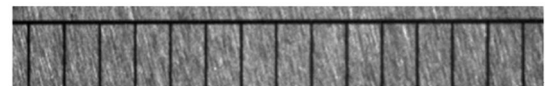


图 3 待测零件图像

Fig. 3 Image of the part to be measured

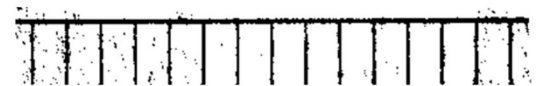
采用两只 Basler CCD 相机, 成像分辨率分别为  $1\ 390\ \text{pixel} \times 1\ 038\ \text{pixel}$  和  $2\ 448\ \text{pixel} \times 2\ 050\ \text{pixel}$ , 分别记为 1 号相机和 2 号相机, 1 号相机用作测量空间的大视场图像采集, 2 号相机用作小视场序列图像采集。1 号相机选配 Pentax 定焦镜头, 清晰成像后, 视场大小为  $216.39\ \text{mm} \times 161.59\ \text{mm}$ , 能够对被测对象进行全局成像。2

号相机视场大小的确定, 需综合考虑 3 个因素: 小视场内被测特征容易识别; 被测特征具有较高的物面分辨率; 总的积累误差小。本实验中, 2 号相机选配 Invarigon 远心镜头, 清晰成像时的视场大小为  $15.79\ \text{mm} \times 13.22\ \text{mm}$ , 可兼顾上述 3 个因素。采用国家 2 等标准线纹尺对测量系统进行标定, 图 4 为小视场标定时, 裁剪得到的线纹尺刻线的原始图像、二值化后的图像及进一步处理后提取刻线间距的图像, 大视场的标定与此类似, 标定数据见表 1。



(a) 标定区域线纹尺刻线的原始图像

a) Original image of line scale reticules in cropped area



(b) 二值化后的刻线图像

(b) Image of reticules after binarization



(c) 提取刻线间距的图像

(c) Image of extracting distances between reticules

图 4 小视场标定过程图像

Fig. 4 Images of calibrating small FOV

表 1 标定数据表

Tab. 1 Calibrating data

相机编号	像素当量值 $\delta/\text{mm} \cdot \text{pixel}^{-1}$
1 号相机	0.155 7
2 号相机	0.006 45

系统标定完成后, 采集待测零件的大视场图像(如图 3), 本实验中, 大视场的成像参数为:

$$\mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 695.5 \\ 519.5 \end{bmatrix}, \quad \delta_x = \delta_y = \delta_1 = 0.1557.$$

据式 (3), 可得到大视场图像上的像素点  $(u, v)$  在测量平面上对应的物理特征点  $(X, Y)$  为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1557 & 0 & -108.289 \\ 0 & 0.1557 & -80.886 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

在大视场图像上进行特征识别,由识别出的特征边界点拟合得到圆孔中心像素坐标及孔径,特征识别结果如图 5 所示。之后,根据公式(9)计算孔  $O_1 \sim O_6$  的物理坐标及孔距,结果如表 2。

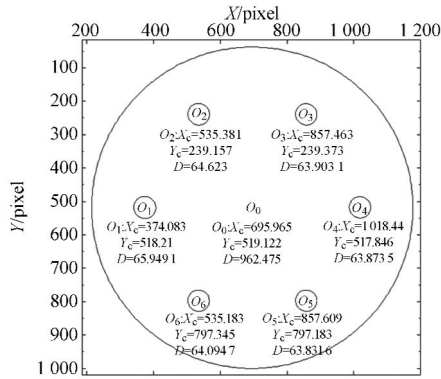


图 5 大视场图像特征识别结果

Fig. 5 Image features and their pixel coordinates identified in large FOV

表 2 大视场图像中待测特征的坐标及其尺寸

Tab. 2 Coordinates and sizes of features in large FOV

特征孔编号	孔中心的测量空间坐标 ( $X_c, Y_c$ ) (mm)	孔直径 $\Phi_i$ (mm)	孔距 $D_{i,i+3}$ (mm)	孔中心线角度 $\theta_i$ (度)
$O_1$	(-50.044 6, -0.200 8)	10.268		
$O_4$	(50.282 5, -0.257 5)	9.945	100.327	180
$O_2$	(-24.930 5, -43.649 4)	10.062		
$O_5$	(25.240 4, 43.235 2)	9.939	100.330	120
$O_3$	(25.217 7, -43.615 7)	9.950		
$O_6$	(-24.961 4, 43.260 5)	9.980	100.326	60

根据大视场图像得到的被测特性信息,即可进行小视场测量路径规划。测量路径的规划可以有多种方案,对于两个圆孔之间距离的测量,一种优化的方案是沿两孔中心线采集序列小视场图像,并使第一副图像和最后一幅图像的中心与两孔中心尽可能重合,这样可以得到较高的圆孔测量精度。按此方案规划测量路径时,序列小视场图像的采集参数依据下列各式计算:

$$n = n_1 + 2, \quad (10)$$

$$n_1 = \text{ceil} \left( \frac{D-H}{H-e \cdot \delta_2} \right), \quad (11)$$

$$m_1 = \frac{1}{2} \left( H + \frac{D-H}{n_1} \right), \quad (12)$$

$$m_2 = \frac{D-H}{n_1}, \quad (13)$$

式中: $n$ 表示两孔之间需采集的小视场图像总数; $n_1$ 表示除第 1 幅和第  $n$  幅图像外,测量路径中间段所需采集的小视场图像数量; $m_1$ 为采集第 2 副图像时,相对于第 1 副图像的位移量;第  $n$  副图像相对于第  $n-1$  副图像的位移量也取此值; $m_2$ 为其他第  $k(k=3, \dots, n-1)$  副小视场图像采集时,相对于第  $k-1$  副图像的位移量, $D$ 表示孔距; $H$ 表示小视场的横向尺寸; $\delta_2$ 为小视场图像的像素当量值; $e$ 为测量装置的位移误差因子,一般取为定位误差的 3 倍; $\text{ceil}(\cdot)$ 为取整函数,即取大于等于表达式值的最小整数。

把表 2 中由大视场图像计算的各孔之间的距离  $D_{i,i+3}$  代入(11)~(13)式,即可得到测量各孔距的序列小视场图像及其采集方向和位置,如此规划的小视场序列图像采集路径如图 6 所示(图中相邻序列图像在待测孔距的垂直方向有错位,是为了表达清楚小视场序列图像的采集方位及其重叠区域,实际测量过程不需错位)。

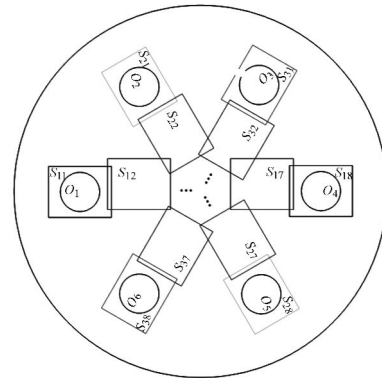


图 6 小视场序列图像采集路径示意图

Fig. 6 Schematic diagram of acquisition path of small FOV images

小视场图像采集完成后,进行辅助测量特征的构造和匹配。如图 7 所示,在序列图像  $S_{ij}$  上构造尺寸特征  $f_{ij}(i=1, \dots, 3; j=1, \dots, 8)$ ,按式(11)~(13)规划测量路径时,使待匹配特征  $f_{ij}$  位于各重叠区域的中心,以简化匹配特征  $f_{ij}'$  的搜索区域的计算。对辅助测量特征  $f_{ij}$ ,在序列图像  $S_{i,i+3}$  上搜索匹配特征  $f_{ij}'$ ,剔除匹配点中的粗大误差后,取各匹配点横坐标的均值,即得  $f_{ij}'$  的数

值坐标  $dcx(f_{ij}')$ 。图 8 为按上述方法在  $S_{11}$  上设定的待匹配线  $f_{11}$  及其在  $S_{12}$  上搜索到的匹配线  $f_{11}'$  的原图。

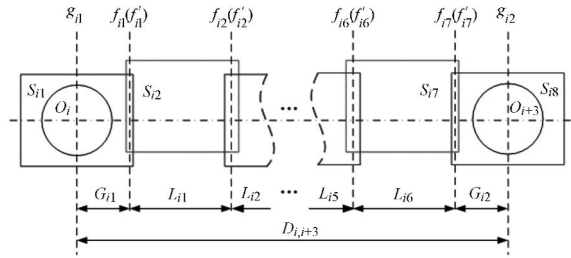
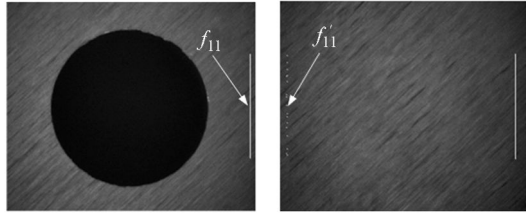


图 7 小视场序列图像测量示意图

Fig. 7 Schematic diagram of measurement of small FOV images



(a)  $S_{11}$  上构造的待匹配线 (b)  $S_{12}$  上搜索到的匹配线  
(a) Line to be matched in  $S_{11}$  (b) Matched line in  $S_{12}$

图 8 辅助测量特征匹配结果图

Fig. 8 Matching results of auxiliary measuring characters

图 7 中,  $G_{i1}$  为孔  $O_i$  的中心与辅助测量特征  $f_{i1}$  之间的距离, 据式 (14) 计算, 孔中心的坐标由孔圆周上的像素点拟合得到;  $G_{i2}$  为孔  $O_{i+3}$  的中心与辅助测量特征  $f_{i7}$  之间的距离, 据式 (15) 计算;  $L_{ij}$  为尺寸特征线  $f_{i,j+1}$  与匹配线  $f_{ij}'$  之间的距离, 据式 (16) 计算; 孔距  $D_{i,i+3}$  据式 (17) 计算。

$$G_{i1} = pcc(f_{i1}) - dcx(O_i) \quad i=1, 2, 3, \quad (14)$$

$$G_{i2} = dcx(O_{i+3}) - dcx(f_{i7}') \quad i=1, 2, 3, \quad (15)$$

$$L_{ij} = pcc(f_{i,j+1}) - dcx(f_{ij}') \quad i=1, 2, 3; j=1, \dots, 6, \quad (16)$$

$$D_{i,i+3} = \delta_2 \left( \sum_{j=1}^2 G_{ij} + \sum_{j=1}^6 L_{ij} \right) \quad i=1, 2, 3, \quad (17)$$

以上各式中, 函数  $pcc(\cdot)$  表示图像上某点在像素坐标系中的列坐标值,  $dcx(\cdot)$  表示图像上某点在数值坐标系中的  $x$  坐标值<sup>[14]</sup>。

6 个孔之间距离的测量数据如表 3 所示。由表可见, 小视场图像相对测量误差在  $\pm 0.03\%$  以内, 测量精度比大视场图像提高 12 倍以上。说明多视场协同测量中, 大视场导向实现自动化和智能化, 小视场进行高精度测量的合理性。

表 3 多视场协同测量实验结果

Tab. 3 Results of the cooperative measurement of multi-FOV

孔距	序列小视场图像辅助测量特征横向坐标及尺寸特征 (pixel)														测得值 $L_i$ (mm)	CMM 测 量值 (mm)	相对 误差		
	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{14}$	$S_{15}$	$S_{16}$	$S_{17}$	$S_{18}$	$S_{19}$	$S_{20}$	$S_{21}$	$S_{22}$	$S_{23}$	$S_{24}$					
$O_1 O_4$	$g_{11}$	$f_{11}$	$f_{11}'$	$f_{12}$	$f_{12}'$	$f_{13}$	$f_{13}'$	$f_{14}$	$f_{14}'$	$f_{15}$	$f_{15}'$	$f_{16}$	$f_{16}'$	$f_{17}$	$f_{17}'$	$g_{12}$	99.983	99.995	-0.012%
$O_2 O_5$	1 221.69	2 379	72.68	2 311	135.8	2 311	136.67	2 311	137.72	2 311	137.59	2 311	136.65	2 379	70.17	1 237.14	100.021	100.000	0.021%
$O_3 O_6$	1 157.31	2 238.32	2 175.20	2 174.33	2 173.28	2 173.41	2 242.35	1 166.98									99.924	99.950	-0.026%

## 5 结 论

针对先进制造现场对高精度、大量程、自动化、数字化测量与检测技术的要求, 在分析二维几何特征视觉测量技术及其存在问题的基础上, 提出机器视觉多视场协同测量方法, 介绍了该方法的原理, 研究了协同测量的关键技术。应用多视场协同测量法对  $\phi 150$  mm 圆盘上分布的 100 mm 孔距进行测量实验, 结果表明相对误差的绝对值不超过 0.03%。多视场协同测量法作为一种新

的机器视觉测量技术, 具有以下特点:

(1) 多视场协同测量技术利用小视场提高图像的物面分辨率, 借助大视场图像信息规划小视场序列图像的采集路径, 并协同小视场序列图像上辅助测量特征的匹配, 很好地协调了测量分辨率和量程范围的矛盾, 充分挖掘了成像器件物理特性的最大潜力。

(2) 机器视觉多视场协同测量法可以充分利用先进的计算机信息处理技术, 发挥其数据处理优势, 实现基于数据处理的测量原理和算法, 以计算资源补偿传统机械系统精度, 以数据处理成本

降低机械系统成本,有利于建造无需精密机械结构、维护简单、使用成本低的高精度自动测量系统。

(3)与坐标测量机相比,机器视觉多视场协同测量的精度不受环境温度和机械坐标精度的影

响,为解决工业现场的高精度测控提供了一种手段,它产生的全数字化测量信息,不但可以向更深层次开发智能化测量仪器,而且也便于与制造过程上下游工序集成,提升制造过程的智能化测控水平。

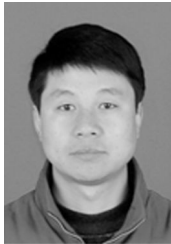
#### 参考文献:

- [1] LU H, SUN C R, ZHOU M, *et al.*. Recent applications of optical and computer-vision methods to research for microelectronics assembly reliability [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(11): 1046-1057.
- [2] MAR N S S, YARLAGADDA P K D V, FOOKES C. Design and development of automatic visual inspection system for PCB manufacturing [J]. *Robotics and Computer -Integrated Manufacturing*, 2011, 27(5): 949-962.
- [3] TETI R, JEMIELNIAK K, DONNELL G O, *et al.*. Advanced monitoring of machining operations [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59(2):717-739.
- [4] KUO W M, CHUANG S F, NIAN C Y, *et al.*. Precision nano-alignment system using machine vision with motion controlled by piezoelectric motor [J]. *Mechatronics*, 2008, 18(1):21-34.
- [5] 刘庆民,王龙山,陈向伟,等. 齿形链板的图像测量 [J]. *光学技术*, 2005, 31(6):843-845.  
LIU Q M, WANG L SH, CHENG X W, *et al.*. Image measurement on the tooth shape chain board [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(6):843-845. (in Chinese)
- [6] 全燕鸣,黎淑梅. 大型工件测量系统中的快速图像拼接方法 [J]. *华南理工大学学报:自然科学版*, 2011, 39(8):60-65.  
QUAN Y M, LI SH M. Fast image mosaic method for large-scale workpiece measurement system [J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2011, 39(8): 60-65. (in Chinese)
- [7] HE B X, ZHANG ZH SH, DAI M, *et al.*. A novel method of machine vision measurement based on sequential partial images [C]. *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics*, Wuxi, 2007:561-566.
- [8] RAJESH S, JAMES S, SAMUEL D. Integrating a vision system with a coordinate measuring machine to automate the datum alignment process [C]. *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Long Beach, 2005:655-661.
- [9] YOON H S, CHUNG S C. Vision inspection of micro-drilling processes on the machine tool [J]. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME*, 2004, 32:391-398.
- [10] DUTTA S, DATTA A, DAS C, *et al.*. Detection of tool condition from the turned surface images using an accurate grey level co-occurrence technique [J]. *Precision-Engineering*, 2012 36(3): 458-466.
- [11] SUN T H, TSENG C C, CHEN M S, *et al.*. Electric contacts inspection using machine vision [J]. *Image and Vision Computing*, 2010, 28(6): 890-901.
- [12] 于起峰,尚洋. 摄像测量学原理与应用研究 [M]. 北京:科学出版社, 2009.  
YU Q F, SHANG Y. *Videometrics: Principles and Researches* [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [13] 牛小兵,林玉池,赵芙蓉,等. 基于特征的二维图像拼接法测量几何量 [J]. *天津大学学报*, 2001, 34(3):396-399.  
NIU X B, LIN Y CH, ZHAO M R, *et al.*. Study on 2-D image connection and its application in geometrical parameters measurement [J]. *Journal of Tianjin University*, 2001, 34(3): 396-399. (in Chinese)
- [14] 何博侠,张志胜,戴敏,等. 基于序列局部图像的高精度测量 [J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(2):367-373.  
HE B X, ZHANG ZH SH, DAI M, *et al.*. A high-precision dimension measurement method based on sequential partial images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 367-373. (in Chinese)
- [15] 张舞杰,杨义禄,李迪,等. 自动影像测量系统关键



- 算法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 294-301.  
ZHANG W J, YANG Y L, LI D, *et al.*. Key algorithms of automatic image measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007 15(2): 294-301. (in Chinese)
- [16] 叶声华, 秦树人. 现代测试计量技术及仪器的发展[J]. 中国测试, 2009, 35(2): 1-6.  
YE SH H, QIN SH R. Development of modern measuring metrological and instrumental technologies[J]. *China Measurement & Test*, 2009, 35(2): 1-6. (in Chinese)
- [17] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2011~2020)[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
Department of Engineering and Materials Sciences, National Natural Science Foundation of China. *Report of the Development Strategy of Mechanical Engineering Science(2011~2012)* [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [18] AL-KINDI G A, SHIRINZADEH B. Feasibility assessment of vision-based surface roughness parameters acquisition for different types of machined specimens [J]. *Image and Vision Computing*, 2009, 27(4): 444-458.
- [19] 周虎, 杨建国, 李蓓智. 基于互信息测度的平面图像拼接及其测量技术[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2011, 37(6): 761-766.  
ZHOU H, YANG J G, LI P ZH. Image mosaic and measurement technology based on mutual information measure[J]. *Journal of Donghua University: Natural Science*, 2011, 37(6): 761-766. (in Chinese)

#### 作者简介:



何博侠(1972—), 男, 甘肃西和人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 2009年于东南大学获得博士学位, 主要从事光电测试技术、微纳米测量技术、机械动力学及先进制造技术的研究。E-mail: heboxia@163.com



何勇(1964—), 男, 湖北麻城人, 博士, 教授, 博士生导师, 1998年于南京理工大学获得博士学位, 主要从事微纳传感器设计与制造技术、飞行器总体技术的研究。E-mail: yhe1964@mail.njust.edu.cn



卜雄洙(1966—), 男, 吉林延吉人, 博士, 教授, 博士生导师, 1993年于南京理工大学获得博士学位, 主要从事智能测控技术与系统、动态测试与虚拟仪器技术、机器视觉等方面的研究。E-mail: buxu105@mail.njust.edu.cn



商飞(1981—), 男, 江苏泰州人, 博士, 讲师, 2009年于吉林大学获得博士学位, 主要从事视觉分析、图像/视频编码、无线传感器网络领域的研究。E-mail: shangfei23@126.com

(本栏目编辑: 李自乐)