

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2514286

# 正交远心机器视觉测量方法及其系统与应用\*

郝飞,焦云东,孙佳浩,徐鸿蒙,孟超  
(南京工程学院机械工程学院 南京 211167)

**摘要:**针对相对较大尺寸零件机器视觉高精度测量需求,采用单目远心视觉系统测量存在范围小,采用平行远心视觉系统测量则可能存在镜头位置干涉的问题,为此提出了一种正交远心机器视觉测量方法及其系统。首先,建立了正交远心视觉测量系统,阐明了正交远心视觉测量系统的构成原理与工作流程。然后,研究了正交远心视觉测量系统的标定方法,其核心是在单目远心成像模型中引入镜像坐标变换数学模型,以及通过标定件统一无公共视野的两套远心系统的坐标系。接着,研究了正交远心视觉测量系统的关键算法,包括基于多邻接像素梯度的图像质量评价、基于图像梯度信息与坐标线性优化的角点两步定位、亚像素边缘检测、基于骨架提取和深度优先搜索策略的测点自动识别与定位等。最后,分别通过实验研究和建立综合误差模型,验证了所提出系统的测量精度,分析了影响系统测量精度的重要因素。实验结果表明,在0级标准量块测量中绝对误差不超过0.012 mm,在玻璃瓶模具瓶口处尺寸测量中最大绝对误差、最小绝对误差以及均方根误差分别为0.035、0.002和0.014 mm。所提出的正交远心视觉测量系统其结果具有精确性和一致性,能够实现相对较大尺寸零件的高精度测量。

**关键词:**正交远心系统;机器视觉测量;大尺寸零件;标定方法;镜像坐标变换

**中图分类号:** TH124 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.2030

## Orthogonal telecentric machine vision measurement method and its system and application

Hao Fei, Jiao Yundong, Sun Jiahao, Xu Hongmeng, Meng Chao

(School of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** To address the demand for high-precision machine vision measurement of the relatively large-sized parts, monocular telecentric systems suffer from a limited measurement range, while parallel telecentric systems risk lens interference. This paper therefore proposes an orthogonal telecentric machine vision measurement method and system. Firstly, the orthogonal telecentric system is established, with a detailed explanation of its composition principle and workflow. Subsequently, the calibration method for this system is investigated, introducing a mirror coordinate transformation model into the monocular telecentric imaging model and unifying the coordinate systems of the two non-overlapping-field-of-view telecentric systems using a calibration artifact. Next, key algorithms for the system are studied, including image quality evaluation based on multi adjacent pixel gradients, two-step corner localization based on image gradient information and coordinate linear optimization, sub-pixel edge detection, and automatic measurement point recognition and localization based on skeleton extraction and depth first search strategy. Finally, experimental studies and a comprehensive error model are employed to verify the system's measurement accuracy and analyze key influencing factors. Experimental results show that the absolute error does not exceed 0.012 mm when measuring Grade 0 gauge blocks. For glass mold bottleneck dimension measurements, the maximum absolute error, minimum absolute error, and root mean square error (RMSE) are 0.035, 0.002, and 0.014 mm, respectively. The proposed orthogonal telecentric system demonstrates high measurement accuracy and consistency, enabling high-

收稿日期:2025-07-19 Received Date: 2025-07-19

\* 基金项目:国家自然科学基金项目(52405550)、江苏高校自然科学研究重大项目(23KJA460009)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX25\_1265)资助

precision measurement of the relatively large-sized parts.

**Keywords:** orthogonal telecentric system; machine vision measurement; large-sized parts; calibration method; mirror coordinate transformation

## 0 引言

机器视觉测量具有非接触性、高精度、自动化的优点,已在零件几何精度检验中应用<sup>[1-5]</sup>。机器视觉测量系统的核心是图像传感器和光学镜头,光学镜头有普通镜头和远心镜头之分。普通镜头具有成本低廉、结构紧凑、视野范围大等优点<sup>[6-7]</sup>,但也存在图像畸变明显、透视失真不可避免等显著的劣势<sup>[8]</sup>,采用普通镜头的系统,其测量结果容易受到物体位置、姿态变化的影响。更严重的问题是,根据小孔成像模型,在回转体直径测量中存在原理性误差<sup>[9-10]</sup>。远心镜头采用特殊光学设计,保证了主光线与光轴的平行,从根本上消除了透视误差,并极大地抑制了畸变,具有高精度、景深内放大倍率恒定等显著优势<sup>[11-12]</sup>。在中小尺寸零件的高精度测量中,特别是在对尺寸和形状要求较高、需要消除视差的场景中,远心机器视觉系统成为首选<sup>[13-15]</sup>。

然而,远心系统在大尺寸零件测量中仍有诸多挑战。众所周知,测量精度与视场是一对矛盾。为提高测量精度,选用放大倍率高的镜头,物方视野变小、景深锐减<sup>[16]</sup>,厚壁或者平整度差的零件将无法测量;而且镜头的倍率越大,尺寸越大,安装难度增加,且成本越高。增加传感器的分辨率,也可以提高测量精度。但是,传感器的分辨率不可能无限制的增加,以及受到光学衍射极限的根本限制,单目远心系统存在精度上限,仍不能充分满足大尺寸零件高精度测量的需要<sup>[17]</sup>。通过算法或者算法和硬件结合,主要包括图像拼接法、精密平台法、图像序列法、多视场协同法等,采用“先‘化整为零’,再‘集零成整’”的思路,实现“低配”系统在大视场下的高精度测量<sup>[18]</sup>。通过算法实现,存在测量精度过渡依赖特征精度的问题;通过结合硬件实现,存在测量范围受限、精密平台成本高的问题。前述方法或是增加相机,或是移动相机,采集多幅图像,相机光轴相互平行。然而,远心镜头

的尺寸通常比较大,在一些场景中安装两套远心系统,会发生尺寸干涉。面向大空间坐标测量,天津大学研发了正交分光视觉位姿测量系统<sup>[19-20]</sup>。两线阵相机的光轴成 $90^\circ$ ,为尺寸干涉问题提供了重要借鉴。为此,本研究提出了正交远心机器视觉测量方法及其系统,研究了系统的标定方法和关键算法,解决了镜头尺寸干涉而无法测量的问题,有望在大尺寸的测量中具有良好的应用。

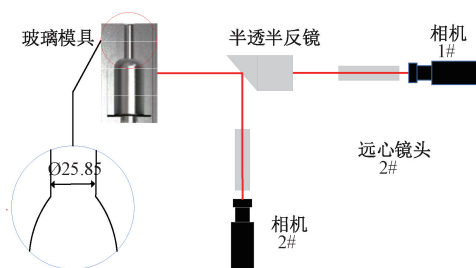
## 1 系统构成、原理及工作流程

### 1.1 正交远心系统构成、原理

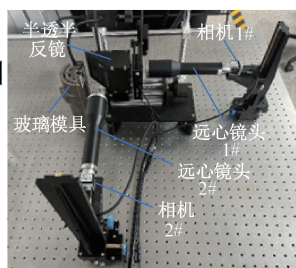
如图1所示,正交远心系统主要由2台工业相机、2个远心镜头、标定件、半透半反镜以及工作台组成。该系统的主要原理是在2台相机公共观测区域放置一个人工标定件,从而建立两者之间的几何关系。标定件、待测零件发出的光线经过半透半反镜分光,形成2个相互正交的光束;在2束光的传播路径上的合适位置安装2台相机,分别采集图像;图像(预)处理,分别提取标定件的多个角点作为候选基准点、零件待测位置处的角点作为待测特征点;遴选基准点,分别建立2台相机的相机坐标系,并通过待测特征点和选定基准点的像素坐标,获得待测特征点在2个相机坐标系下的坐标;通过基准点之间的位置和尺寸信息,将像素坐标变换到空间坐标,并实现2个相机坐标系统一,从而最终实现平面尺寸的测量。

### 1.2 正交远心系统工作流程

标定是实现像素坐标到空间坐标变换以及统一2个相机坐标系,从而最终实现相对较大尺寸视觉测量的首要步骤。标定后的正交远心系统,进行相对较大尺寸测量,主要包括图像采集、图像预处理、特征提取、坐标变换、几何尺寸计算及精度分析等过程。图像质量对机器视觉系统至关重要,高质量的图像能提高机器视觉系统的性能和测量精度。因此,针对标定、测量过程,可以



(a) Composition of orthogonal telecentric vision measurement



(b) System built for verification

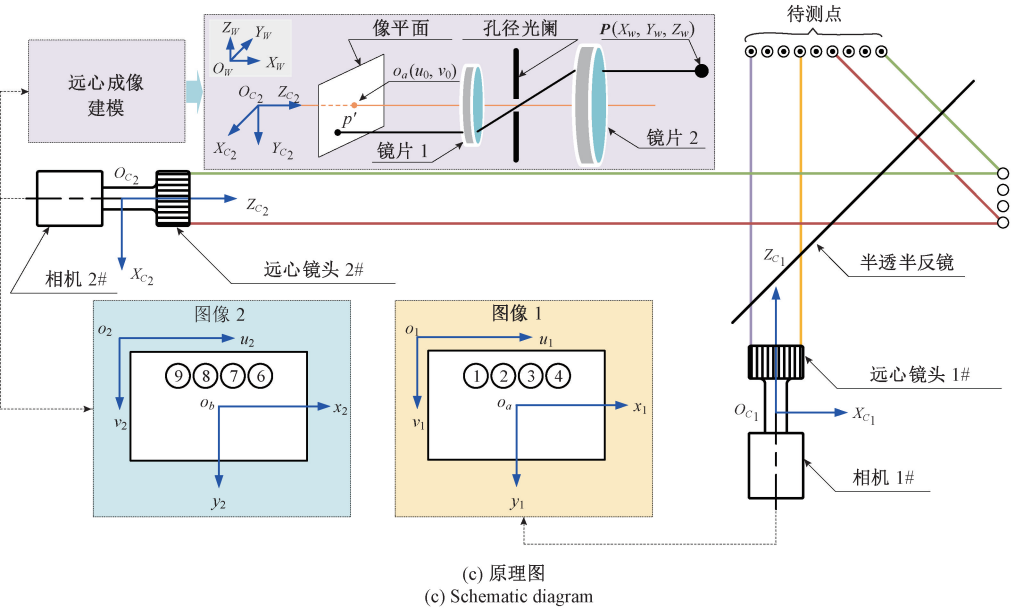


图 1 正交远心系统的结构

Fig. 1 Structure of the orthogonal telecentric visual measurement system

通过对图像质量进行主观、客观评价,明确影响图像质量的主要因素,比如是否准确对焦、曝光时间、照明条件等,进一步地可以优选主要影响因素的参数;当正交远心系统投入使用以后,也可以定期/不定期地开展图像质量主客观评价,调整系统确保其处于最优状态。

## 2 正交远心系统的标定

### 2.1 单目远心成像系统的参数标定算法

如图 1(a) 所示,单目远心成像系统的数学模型如式(1)~(3)所示。

$$P_c = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} P_w \quad (1)$$

式中: $P_w = (X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$  是空间任意一点  $P$  在世界坐标系下的齐次坐标; $P_c = (X_c, Y_c, Z_c, 1)^T$  则是该点在相机坐标系下的齐次坐标。令  $\mathbf{R} = [r_{ij}]$  是旋转矩阵,  $\mathbf{T} = [t_x, t_y, t_z]^T$  是平移向量。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & -m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $m$  是远心镜头的有效放大倍数; $(x, y)^T$  是  $P$  点在图像坐标系下的坐标。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_u & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $d_u$  和  $d_v$  分别表示图像传感器沿  $u$  轴和  $v$  轴的像素尺寸; $(u_0, v_0)^T$  是图像坐标系的原点在像素坐标系下的

坐标。

单目远心成像系统参数标定包括内参  $m, d_u, d_v, u_0, v_0$  以及外参  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$ ,采用 Yuan 等<sup>[21]</sup> 提出的通过虚拟目标的单目远心相机参数标定方法。

### 2.2 单目远心成像系统各坐标系间的变换关系

如图 2 所示,基准点 1# 和 2# 的像素坐标分别为  $(u_1, v_1)$  和  $(u_2, v_2)$ ,测点的像素坐标为  $(u_p, v_p)$ 。

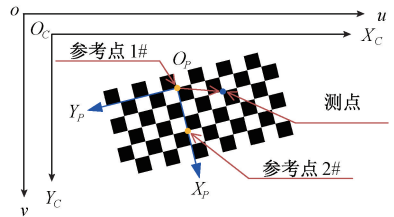


图 2 相机坐标系、像素坐标系以及棋盘格坐标系  
Fig. 2 Camera coordinate system, pixel coordinate system and checkerboard coordinate system

令  $\mathbf{a} = [(u_2 - u_1), (v_2 - v_1)]^T, \mathbf{b} = [(u_p - u_1), (v_p - v_1)]^T$  以及  $\mathbf{s} = [s_x, s_y]^T$ , 其中  $s_x = d_u/m$  和  $s_y = d_v/m$ , 分别表示相机  $u$  轴和  $v$  轴的像素当量。那么,测点在棋盘格坐标系  $o_p-x_p y_p$  下的坐标  $(x_p, y_p)$  为:

$$\begin{cases} x_p = \frac{\{\mathbf{a}, \mathbf{s}\} \times \{\mathbf{b}, \mathbf{s}\}}{|\{\mathbf{a}, \mathbf{s}\}|} \\ y_p = \pm \frac{|\{\mathbf{a}, \mathbf{s}\}| \times \{\mathbf{b}, \mathbf{s}\}}{|\{\mathbf{a}, \mathbf{s}\}|} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\{\mathbf{a}, \mathbf{s}\}$  和  $\{\mathbf{b}, \mathbf{s}\}$  表示向量  $\mathbf{a}$  与  $\mathbf{s}, \mathbf{b}$  与  $\mathbf{s}$  的逐元素乘积(哈达玛积);当  $\mathbf{a}$  和  $\mathbf{b}$  叉乘结果向量的方向垂直棋盘

格面向外时  $y_p$  的值为负,否则为正。

通过二维坐标变换,将测点坐标  $(x_p, y_p)$  变换到相机坐标系下  $(x_c, y_c)$ ,如式(5)所示。

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & t_u \\ \sin \theta & \cos \theta & t_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\theta$ 为坐标轴  $x_c, x_p$  之间的夹角,取值范围是  $-180^\circ \sim 180^\circ$ ;  $t_u = s_x \times (u_1 - u_0)$ ;  $t_v = s_y \times (v_1 - v_0)$ 。

### 2.3 两套单目远心成像系统的坐标系统一

考虑到单目远心成像系统的成像视野范围比较小,以及结合图1所示的测量系统布局,2套单目远心成像系统并没有公共的成像区域,所以,按照式(6)~(7)将2套单目远心成像系统的坐标系统一到1个全局坐标下。

$$p_1 = A_1 \times C_1 \times P_w = H_1 \times P_w \quad (6)$$

$$p_2 = A_2 \times C_2 \times R_f \times (P_w + T') = H_2 \times Q_w \quad (7)$$

式中: $P_w$ 是空间一任意点  $P$  在世界坐标系下的齐次坐标; $C_1$ 是相机1#的外参数; $A_1$ 是相机1#的内参数; $p_1$ 是点  $P$  在相机1#上所成像在像素坐标系下的齐次坐标; $Q_w$ 是空间另一任意点  $Q$  在世界坐标系下的齐次坐标; $C_2$ 是相机2#的外参数; $A_2$ 是相机2#的内参数; $p_2$ 是点  $Q$  在相机2#上所成像在像素坐标系下的齐次坐标。 $P$ 和 $Q$ 的 $Z$ 坐标始终相同,即  $Q_w = P_w + T'$ ,平移向量  $T'$  的第3个分量为0; $R_f$ 是镜像坐标变换矩阵,即:

$$R_f = \begin{bmatrix} R_R & V \\ \theta & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $R_R = I - 2M/N$ ,  $M = n \cdot n^T$ ,  $N = n^T \cdot n$ ,  $n = (n_x, n_y, n_z)^T$ ;  $V = (-2D/N) \cdot n$ ,  $(X, Y, Z) \cdot n + D = 0$  是半透半反镜的镜面在世界坐标下的平面方程。

根据式(6)~(8),以及文献[21]提出的单目远心相机内外参数标定方法,通过棋盘格作为靶标,可以将2台正交的远心成像系统建立联系,统一到世界坐标。

## 3 正交远心系统的关键算法

### 3.1 图像质量评价算法

为采集高质量图像,需要对系统采集的图像进行准确评价,以确定系统最优的参数。Brenner函数以2为步长,计算图像每个像素点在  $x$  方向上的梯度,通过所有像素的梯度平方和构造梯度评价函数,是空间域灰度评价算法的典型代表,具有计算简单、运算量小的特点。但是,它也存在评价结果容易被噪声干扰、对细节关注不够、适应性差、局部最小值/最大值以及像素溢出导致结果失真等问题。因此,根据图像的灰度特征对Brenner函数进行改进,通过计算每个像素的灰度值与该像素上下

左右4个相邻像素灰度值均值的差,作为该像素的梯度,通过所有像素的梯度绝对值和构造梯度评价函数,如式(9)所示。

$$F = \sum_{x=1}^{M-2} \sum_{y=2}^{N-1} |i(x, y) + i(x+1, y-1) + i(x+2, y) + i(x+1, y+1) - 4 \cdot i(x+1, y)| \quad (9)$$

式中: $i(x, y)$ 为图像在  $(x, y)$  处的像素灰度值; $M$ 和 $N$ 分别为图像的行数和列数。

### 3.2 特征检测算法

#### 1) 角点提取算法

传统的角点提取算法在处理边缘附近非角点时容易受到干扰,角点定位精度低。为此,本研究提出了先通过图像梯度信息对角点进行粗定位,再通过坐标线性优化对角点进行精定位的方法。

#### (1) 通过MinEigen算法进行角点粗定位

通过分析图像特征最小值,定位潜在的角点。对每个像素点  $(x, y)$ ,定义一个局部窗口,则该窗口内像素点的梯度信息组成结构矩阵  $M$ ,即:

$$M = \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $I_x$ 和 $I_y$ 分别是图像在像素点  $(x, y)$  处的水平和垂直梯度。

令  $T = \min(\lambda_1, \lambda_2)$ ,  $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 是结构矩阵  $M$  的2个特征值。当  $T > Th$  时 ( $Th$ 是设定的阈值),则判定该像素点为角点。

#### (2) 通过坐标线性优化提高角点的定位精度

棋盘格是由行方向、列方向两组正交且等间距的平行线构成的平面网格图案,行方向、列方向的两条直线相交形成角点。在前一步提取到的棋盘格角点,可以引入棋盘格网格的平行、等间距等特征作为约束条件,以提高角点的定位精度。棋盘格的角点应是一族平行线中某条直线上的点,即:

$$n \times p + k\delta = 0 \quad (11)$$

式中: $n = (\cos \theta, \sin \theta)$ 是单位法向量,表示平行线的方向, $\theta$ 是法线与  $u$  轴的夹角; $p = (u, v)$ 是像素坐标系下任意一个点的坐标; $\delta$ 表示平行线之间的间隔; $k$ 是整数,表示棋盘格的行标或列标。

通过MinEigen算法进行角点提取,根据角点的坐标对角点归类,利用平行、等间距的约束条件,分别拟合得到行方向、列方向两族平行线的方程,以正交平行线网格的交点坐标作为优化后的角点坐标。

#### 2) 亚像素边缘检测

为提高测量系统的精度,采用基于灰度矩的亚像素边缘检测算法。基于矩的亚像素边缘定位的基本原理是假设图像实际边缘与理想边缘的阶跃模型的矩一致,利用矩不变的性质定位目标图像的边缘,得到边缘参数。

基于矩的亚像素边缘检测其抗噪声能力强,对乘性噪声和加性噪声均不敏感。因此,矩方法被广泛使用。常用的矩方法有灰度矩法、Zernike 矩法及空间矩法。灰度矩利用图像灰度值的分布特征,计算量偏大。Zernike 矩的各个分量间相互独立、正交,可以减少信息冗余,计算量小。空间矩利用图像空间域分布特性,涉及积分运算,计算相对复杂<sup>[22]</sup>。

### 3.3 测点自动识别与定位

倒角是机加工中一个至关重要、具有积极意义的设计和制造特征。通过机器视觉来实现机械零件的几何精度检验,需要在倒角处确定测点。在倒角过渡处自动识别并准确地定位测点,是实现自动化测量、保证测量的精度的重要前提。倒角过渡区域的细节在图像中不明显,常用的角点提取方法难以精确地定位测点。因此,本研究提出了一种基于骨架提取和深度优先搜索策略的测点自动识别与定位方法。首先在二值图像上实现模具骨架的精确、高效提取,再用搜索策略在骨架上快速识别、定位测点。

#### 1) 改进的 Zhang-Suen 算法

针对在二值图像中精确、高效提取模具骨架的问题,本研究对 Zhang-Suen 骨架提取算法<sup>[23]</sup>进行了改进,主要工作包括:(1)对二值图像进行形态学腐蚀操作,消除对象内部的像素,作为初始骨架。(2)为更好地处理节点,引入一个 $3 \times 3$ 的中值滤波矩阵,中心元素设为0,周围元素为1。统计 $3 \times 3$ 窗口中心数值为0的个数,当窗口中心数值为0且总共有2个以上非零数值时,该位置是骨架中的节点。该算法有效地去除了无效分支,减少运算量。

#### 2) 动态阈值深度优先搜索策略

通过深度优先搜索策略(depth-first search, DFS)识别、定位测点,必须先设定好测点的判定条件。根据倒角处的几何特征,对每一个搜索路径进行最小二乘直线拟合,再计算骨架中每个像素点到所拟合直线的距离,并将所有距离的平均值作为阈值,建立目标点的动态判定条件,提出一种动态阈值深度优先搜索策略。通过动态阈值深度优先搜索策略识别、定位测点,主要有初始化端点、遍历图像、构建点序列、阈值动态设定等步骤。

## 4 实验与结果分析

### 4.1 系统标定实验结果

图1所示正交系统,2台相机的型号均为Basler ACA2440-35  $\mu\text{m}$ ;双侧远心镜头的标称有效放大倍率为0.5,工作距离为178 mm,景深为3.1 mm;高精度棋盘格靶标的单元格尺寸2 mm;在确保不超出景深的前提下随机变换靶标的位姿,采集15幅图像,标定正交系统的内、

外参数,结果如表1和2所示。

表1 远心成像系统内参的标定结果

Table 1 Calibration results of intrinsic parameters of the telecentric imaging system

相机	$m$	$k_1$	$k_2$
1#	0.499 1	$-6.77 \times 10^{-4}$	$5.05 \times 10^{-4}$
2#	0.501 3	$-0.90 \times 10^{-4}$	$0.45 \times 10^{-4}$

表2 远心系统成像其第1幅图像所对应的外参

Table 2 Extrinsic parameters corresponding to the first image imaged by the telecentric system

相机	旋转矩阵	平移向量
1#	$\begin{bmatrix} 0.998\ 7 & 0.051\ 6 & 0 \\ -0.051\ 6 & 0.998\ 7 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.6 \times 10^{-7} \\ -2.4 \times 10^{-7} \end{bmatrix}$
2#	$\begin{bmatrix} -0.998\ 1 & -0.052\ 4 & 0.035\ 0 \\ -0.051\ 0 & 0.998\ 2 & 0.035\ 0 \\ 0.036\ 6 & -0.033\ 1 & 0.998\ 7 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 26.026\ 3 \\ 6.2 \times 10^{-4} \\ 411.601\ 2 \end{bmatrix}$

从标定结果看,相机1#和2#的远心成像倍率与标称的相对误差不超过3%;统计、分析靶标在各位姿下各点沿 $u$ 和 $v$ 轴的重投影误差,最大不超过1 pixel;内外参数的标定结果可以满足测量要求。

### 4.2 特征检测实验结果

#### 1) 角点提取

为验证两步角点提取优化方法的效果,每次任取10组数据计算棋盘格间距的平均值,与棋盘实际间距对比,结果如表3所示。

表3 角点坐标精度对棋盘格间距测量结果的影响

Table 3 The influence of coordinate accuracy of corner points on the measurement results of checkerboard spacing

棋盘格间距	优化前	优化后
3	2.979	3.006
6	5.987	5.993
9	8.971	8.999
12	11.994	11.996

由表3可知,优化前的平均误差为17.25  $\mu\text{m}$ ,优化后的平均误差为4.5  $\mu\text{m}$ ,优化后棋盘格角点的定位精度提升了约73.9%。

#### 2) 亚像素边缘检测

为了验证灰度矩、Zernike 矩的亚像素边缘检测效

果,利用1#相机采集图像进行实验,如图3所示。

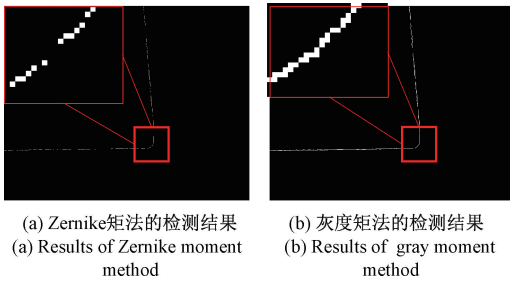


图3 边缘检测结果

Fig. 3 Results of the edge detection

由图3可知,Zernike矩法的定位精度高,但瓶口关键区域的边缘存在丢失。针对瓶口处相同大小的区域进行统计发现,灰度矩法检测到26个像素点,比Zernike矩法多14个像素点。可见,虽然灰度矩法的检测速度不及Zernike矩法,但是它更完整地保留了瓶口边缘信息,并且也具有较高的亚像素边缘定位精度。

#### 4.3 尺寸测量与结果分析

分别以0级标准量块的示值为参考、以三坐标测量机(coordinate measuring machine, CMM) NC8107的测量结果为参考,开展了一系列的测量实验,以验证所提出的正交远心视觉测量方法及其系统的精度。

##### 1) 标准量块尺寸测量实验

选取3种规格的0级标准量块进行实验,每种规格量块分别测量10次,如表4所示,并进行了测量误差分析,从而验证所提出的正交远心系统的性能。实验过程中,将量块放置在升降台上,利用激光水平仪调整量块至合适的位置,如图4所示。

表4 标准量块的测量结果

Table 4 Measurement results of gauge blocks

量块规格/mm	测量结果	绝对误差	相对误差/%
20	20.012	0.012	0.6
25	25.013	0.013	0.5
30	30.008	0.008	0.3

由表4可知,采用了亚像素级边缘定位的正交远心系统,平均测量误差不超过0.02 mm,符合玻璃瓶模具产品检具的精度要求。

##### 2) 玻璃瓶模具瓶口处尺寸测量实验

NC8107型CMM的最大允许误差(maximum permissible error, MPE)包括固定误差和比例误差2个部分,其中固定误差为2.5  $\mu\text{m}$ ,比例误差的系数为3.3  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。玻璃瓶模具瓶口处的名义尺寸为25.85 mm,此时CMM的MPE约为2.6  $\mu\text{m}$ 。CMM及其测量结果如表5所示。

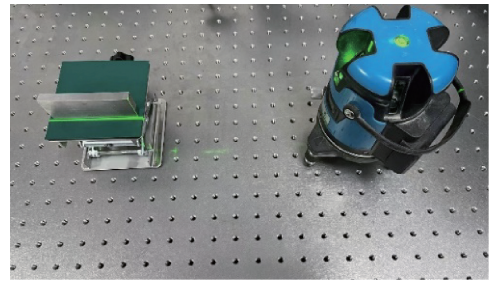


图4 激光水平仪校正量块位置

Fig. 4 Calibrating the position of the measuring block by using a laser level

表5 CMM及其测量结果

Table 5 CMM and its measurement results

三坐标测量机	项目	数值
	名义值	25.850
	测量值	25.856

利用所提出的正交远心系统,以玻璃瓶模具瓶口处尺寸为对象,开展4组实验,每组重复测量5次,结果如表6所示。需要注意的是,在开始测量前,仍需用激光水平仪调整模具至合适位置。

由表6可知,本研究所提出的正交远心系统其最大和最小测量误差分别约为0.035和0.002 mm,且95%以上的绝对误差不超过0.03 mm;平均绝对误差约为0.017 mm,平均相对误差约为0.3‰;系统误差约为-0.001 mm,均方根误差约为0.014 mm。

平均相对误差0.3‰证实本研究的正交远心系统具有较高的精确度;系统误差约为1  $\mu\text{m}$ ,没有出现显著的偏差,表明本研究的正交远心系统测量准确。均方根误差为0.014 mm,综合反映了本研究的正交远心系统多次测量结果的离散程度,表明在不同测量条件下,系统具有良好的稳定性。最大测量误差0.035 mm,最小误差0.002 mm,且实验测量结果整体偏大,表明系统在不同测量点上的表现有所差异,存在客观原因致使数据偏大。综上,本研究所提出的正交远心系统其测量结果具有较高精确性和较好一致性。

#### 4.4 测量系统综合误差建模及分析

根据测量原理可知,尺寸计算依赖测点的空间坐标,而测点的空间坐标则由2台相机采集的棋盘格图像的角点、模具图像的特征点像素坐标解算而得到。测点P在系统世界坐标中的坐标不仅取决于其在两幅图像上的像素

表 6 玻璃瓶模具瓶口处尺寸测量的结果

Table 6 Measurement results of dimensions at the mouth of the glass bottle mold

组别	序号	测量结果	绝对误差	相当误差/%	平均误差
1	1	25.883 7	0.027 7	0.11	0.020
	2	25.882 8	0.026 7	0.10	
	3	25.881 2	0.025 2	0.17	
	4	25.869 6	0.013 6	0.05	
	5	25.865 4	0.009 0	0.03	
	6	25.891 2	0.035 1	0.14	
2	7	25.854 2	0.001 8	0.01	0.014
	8	25.868 7	0.012 7	0.05	
	9	25.873 3	0.017 3	0.07	
	10	25.853 3	0.002 7	0.01	
3	11	25.891 2	0.035 1	0.14	0.017
	12	25.854 2	0.001 8	0.01	
	13	25.857 9	0.001 9	0.01	
	14	25.879 6	0.023 5	0.09	
	15	25.878 6	0.022 6	0.09	
4	16	25.879 6	0.023 5	0.09	0.018
	17	25.880 0	0.024 0	0.09	
	18	25.863 8	0.008 0	0.03	
	19	25.861 8	0.006 0	0.02	
	20	25.882 5	0.026 5	0.10	

坐标,还和远心视觉测量系统结构参数、标定精度、参考点坐标、参考原点之间距离等有关。综合误差模型如式(12)所示。

$$P(X_w, Y_w) = F(\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots) \quad (12)$$

式中: $\Delta_i$  是影响远心视觉系统测量精度的变量。

第  $k$  个影响变量的误差用  $\delta_k$  表示,根据误差传递与合成理论<sup>[24]</sup>,测点  $P$  其  $x$  方向和  $y$  方向的误差为:

$$\begin{cases} \Delta X_w = \sum_k \frac{\partial F_{X_w}}{\partial \delta_k} \times \delta_k \\ \Delta Y_w = \sum_k \frac{\partial F_{Y_w}}{\partial \delta_k} \times \delta_k \end{cases} \quad (13)$$

1) 标定精度对测量误差的影响

相机标定的精度受到多种因素的影响。通常,在标定过程中采集的图像数量越多,标定结果的准确性就越高,进而可以提升系统的测量精度。实验中拍摄 18 幅标定板图像,并选择其中一部分图像进行系统标定。随后,利用标定后的参数对系统进行校正,以距离固定的两点为对象,进行了多次测量验证。标定图像的数量对测量

结果的影响如图 5 所示。

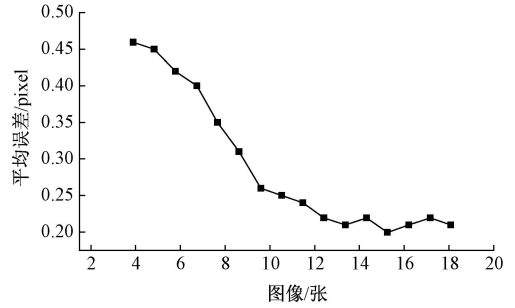


图 5 标定图像数量对平均像素误差的影响

Fig. 5 Influence of the number of calibration images on the average pixel error

由图 5 可知,系统误差与标定图像的数量之间存在密切关系。随着标定图像数的增加,测量系统的平均像素误差在逐渐减小。当标定图像超过 12 张,系统误差的变化不大,表明在系统标定过程中,至少要采集 12 张标定图像,以提高标定精度和稳定性。

2) 两相机光轴夹角对测量误差的影响

由正交远心视觉测量原理可知,两相机光轴应保持正交,但在实际安装过程中不可能保持绝对正交,两相机光轴之间夹角变化会引起测量误差。两相机光轴不垂直,会导致角点在成像面上投影发生变化。为简化分析,不妨假设实际成像面是绕理想成像面上一直线(旋转轴)转过角度  $\alpha$ ,此时两相机光轴的夹角为  $90^\circ - \alpha$ 。根据远心视觉系统的数学模型和综合误差模型,通过直接数据代入,分析了旋转轴位置、转角两个因素对角点位置误差的影响,结果如图 6 所示。

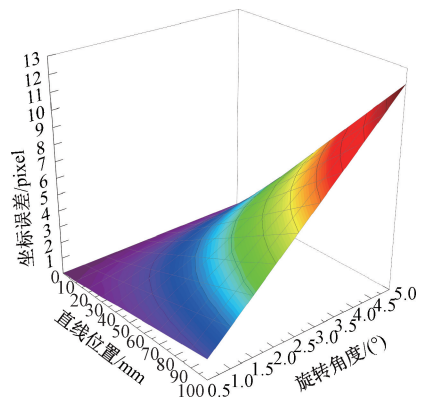


图 6 旋转轴位置和旋转角度对角点位置误差的影响

Fig. 6 Influence of rotation axis and rotation angle on corner point position error

由图 6 可知,转角  $\alpha$  在  $[0^\circ \sim 1^\circ]$  时,转轴位置对角点坐标的影响不大。然而,实际的硬件安装过程中,无法

确定和控制成像面的旋转位置,只能通过减小转角度来控制误差。当相机光轴夹角在 $[89^\circ \sim 90^\circ]$ 时,系统测量误差较小,测量精度较高。

### 3) 角点精度对测量误差的影响

根据正交远心系统的数学模型,2个测点之间的距离 $d$ 和测量系统的参数 $\Omega$ 、2个测点的角点坐标、棋盘格上参考点的角点坐标(参考点的数量应不少于2对)可以用式(14)表示。

$$d = Q(\Omega, x_L, x_{L1}, x_{L2}, y_R, y_{R1}, y_{R2}, \dots) \quad (14)$$

测点的角点像素坐标、参考点的角点像素坐标对两点之间的距离 $d$ 的影响如图7所示。

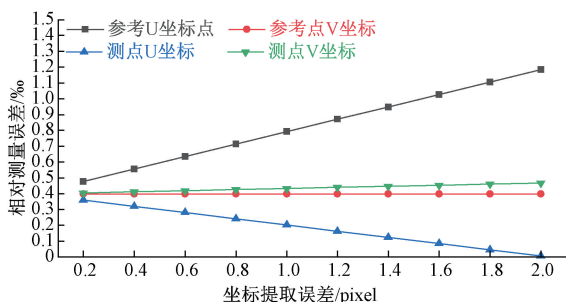


图7 角点坐标误差对测量误差的影响

Fig. 7 Influence of the corner coordinate error on measurement error

由图7可知,保持其他影响因素不变,相对误差随着测点、参考点的 $u$ 坐标提取误差或者 $v$ 坐标提取误差线性变化;当角点像素坐标提取误差不超过2个像素时,相对误差不超过1.3%。相对误差随参考点的 $u$ 坐标、 $v$ 坐标提取误差以及测点 $v$ 坐标提取误差线性增大,其中随参考点的 $u$ 坐标提取误差增大最明显,最大值相对最小值增幅近150%,而随参考点的 $v$ 坐标提取误差的增大最不显著,最大值相对最小值增幅只有0.07%。与以上不同,随着测点的 $u$ 坐标提取误差沿着 $u$ 轴正方向增加,相对误差线性减小;而沿着 $u$ 轴负方向增加,相对误差则会增大。

## 5 结 论

针对相对较大尺寸高精度测量的问题,本研究提出并实现了一种正交远心机器视觉测量方法及其系统。研究建立了该系统的结构原理与工作流程,然后开发了基于镜像坐标变换模型和棋盘格的标定方法,有效解决了无公共视野两套远心系统的坐标统一问题。接着,针对系统应用需求,研究并集成了包括图像质量评价、角点精确定位、亚像素边缘检测以及测点自动识别等关键算法。最后,以玻璃瓶模具瓶口处尺寸为对象进行了实验研究,并建立了综合误差模型,分析了标定精度、光轴夹角、角

点精度等重要因素对测量精度的影响。实验结果证明,在玻璃瓶模具瓶口处尺寸测量中平均绝对误差是0.017 mm,均方根误差是0.014 mm。本研究的正交远心系统克服了传统远心系统的局限性,为大尺寸零件的高精度、高效率机器视觉测量提供了一种有效解决方案。

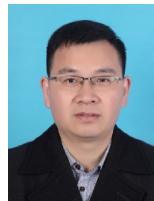
## 参考文献

- [1] 杜坡,段振云,张静,等. 基于双目视觉的大直径零件转角高精度测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 35-43.  
DU P, DUAN ZH Y, ZHANG J, et al. A high-precision measurement method for rotation angles of large-diameter components based on binocular vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4): 35-43.
- [2] 赵凤胜,袁海兵,吴俊,等. 基于机器视觉的汽车管法兰尺寸检测系统[J]. 电子测量技术, 2023, 46(2): 154-160.  
ZHAO F SH, YUAN H B, WU J, et al. Machine vision-based dimensional inspection system for automotive pipe flanges [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(2): 154-160.
- [3] GUO J, YANG Y, CHEN X Y. Research on sub-pixel accuracy flange disk dimension measurement based on machine vision [J]. Signal, Image and Video Processing, 2024, 18(8): 6185-6195.
- [4] 张国锋,杨树明,胡鹏宇,等. 大跨距孔同轴度误差快速视觉测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 219-226.  
ZHANG G F, YANG SH M, HU P Y, et al. Fast vision-based measurement method for coaxiality error of long-span holes [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 219-226.
- [5] 孔盛杰,黄翔,周蒯,等. 基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 247-255.  
KONG SH J, HUANG X, ZHOU K, et al. Detection method of addendum circle of gear structure based on machine vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 247-255.
- [6] WANG P S, YANG ZH J, YANG N, et al. Cross-scale dimensional measurement of high-precision modules based on machine vision [J]. Measurement Science and Technology, 2025, 36(5): 055027.
- [7] MANAGE N, MEDAGEDARA N T. Design and development of a vision-based hydraulic operated mending machine for repairing 3W forks [J]. Instrumentation, 2020, 7(4): 1-10.
- [8] WANG R, DUAN F J, FU X, et al. Method for measuring geometric dimensions of micro parts based on a



- telecentric camera[J]. *Optics Express*, 2025, 33(11): 23580-23595.
- [9] HAO F, SHI J F, MENG CH, et al. Measuring straightness errors of slender shafts based on coded references and geometric constraints[J]. *The Journal of Engineering*, 2020(6): 221-227.
- [10] 张伟, 韩宗旺, 程祥, 等. 基于机器视觉零件轴线直线度误差测量的研究[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(9): 2168-2177.
- ZHANG W, HAN Z W, CHENG X, et al. Research on straightness error measurement of part axis based on machine vision[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(9): 2168-2177.
- [11] YANG Y CH, ZHANG S. Pixelwise calibration method for a telecentric structured light system[J]. *Applied Optics*, 2024, 63(10): 2562-2569.
- [12] LI H, LIAO ZH, CAI W B, et al. Flexible calibration of the telecentric vision systems using only planar calibration target[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 3332934.
- [13] 张诗婧, 莫绪涛, 董杨林, 等. 球面折反射成像的内螺纹螺距视觉测量系统[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(10): 211-220.
- ZHANG SH J, MO X T, DONG Y L, et al. Visual measurement system for internal thread pitch based on spherical catadioptric imaging[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(10): 211-220.
- [14] MAKHESANA M A, BAGGA P J, PATEL K M, et al. Comparative analysis of different machine vision algorithms for tool wear measurement during machining[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2025, 36: 4567-4591.
- [15] MAO Y N, WANG S ZH, CHEN L, et al. Plastic optical fiber dimension measurement based on canny edge detection and hough line detection[C]. 2024 IEEE 7th IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, 2024: 375-379.
- [16] HUANG Y P, CHEN X G, ZHANG H, et al. Optical design of a double-sided telecentric zoom system with large field of view[J]. *Optics Communications*, 2025, 583: 131765.
- [17] WANG Y M, FANG F ZH. Stereo bi-telecentric phase-measuring deflectometry[J]. *Sensors*, 2024, 24(19): 6321.
- [18] 郝飞. 机器视觉测量关键技术研究及其在细长轴中应用[D]. 南京:东南大学, 2015.
- HAO F. Key technology of machine vision measuring and its application in slender shaft[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [19] 杜睿, 段发阶, 李遥, 等. 正交分光成像系统实时多光斑亚像素定位研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2021(9): 87-91.
- DU R, DUAN F J, LI Y, et al. Research on real-time multi spot sub-pixel positioning of orthogonal split imaging system[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2021(9): 87-91.
- [20] 赵娜. 正交分光视觉位姿测量系统关键技术研究[D]. 天津:天津大学, 2021.
- ZHAO N. Research on key technologies of orthogonally splitting imaging vision pose measurement system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [21] YUAN Q, WU J J, ZHANG H L, et al. Pixel-wise calibration method based on the virtual plane for telecentric structured light system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 175: 108049.
- [22] 曾猛杰, 汪晨曦, 赖俊杰, 等. 亚像素边缘检测算法综述[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(23): 3513-3524.
- ZENG M J, WANG CH X, LAI J J, et al. Review of sub-pixel edge detection algorithms[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(23): 3513-3524.
- [23] MA J, REN X H, TSVIATKOU V Y, et al. A novel fully parallel skeletonization algorithm[J]. *Pattern Analysis and Applications*, 2022, 25(1): 169-188.
- [24] 陈宇轩, 仇中军, 汤俊杰. 线扫描视觉检测系统机械——成像综合误差建模[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(12): 183-192.
- CHEN Y X, QIU ZH J, TANG J J. Mechanical-imaging comprehensive error modeling in line scan vision detection systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(12): 183-192.

## 作者简介



郝飞(通信作者), 2004年于长安大学获得学士学位, 2007年于长安大学获得硕士学位, 2015年于东南大学获得博士学位, 现为南京工程学院教授, 主要研究方向为机器视觉技术、非线性时序建模。

E-mail: feehao2012@163.com

**Hao Fei** (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. degrees both from Chang'an University in 2004, 2007, respectively, and his Ph. D. degree from Southeast University in 2015. He is currently a professor with Nanjing Institute of Technology. His main research interests include machine vision and nonlinear time series modeling.