

文章编号 1004-924X(2026)12-1890-14

双视场同轴对准误差分析与补偿方法

焦少伟¹, 黄鹏鹏¹, 杨兴伦¹, 裴宇航¹, 计 韬¹, 张记云², 娄志峰^{1*}

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 北京机械工业自动化研究所有限公司, 北京 100120)

摘要:针对精密装配中同轴对准精度要求高的应用场景,构建了一套双视场远心成像视觉测量系统。系统区别于传统的多相机或立体视觉系统,不存在公共视场,两个远心成像单元之间难以直接建立联系。为此,本文提出了一种适用于双视场远心成像系统的同轴对准方法。通过驱动标定板依次进入两个远心成像单元的视野中,从而将二者联系起来,并构建了同轴对准数学模型。在此基础上,以衔铁组件为研究对象,系统分析了影响同轴对准精度的各类误差源,并基于阿贝-布莱恩原理开展误差建模,进而提出相应的误差补偿策略。后续通过压印实验结果表明,同轴对准偏差均控制在 5 μm 以内。进一步通过衔铁组件压装实验,验证了所提方法在实现孔轴连接件精密装配中的可行性与有效性。

关键词:远心成像;精密装配;误差补偿;同轴对准;双视场

中图分类号:TH74;TH166 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20263412.1890

CSTR:32169.14.OPE.20263412.1890

Error analysis and compensation method for dual-field coaxial alignment

JIAO Shaowei¹, HUANG Pengpeng¹, YANG Xinglun¹, PEI Yuhang¹, JI Tao¹,
ZAHNG Jiyun², LOU Zhifeng^{1*}

(1. College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Beijing Research Institute of Automation for Machinery Industry Co., Ltd., Beijing 100120, China)

* Corresponding author, E-mail: louzf@dlut.edu.cn

Abstract: For precision assembly tasks with high requirements for coaxial alignment accuracy, a dual-field telecentric vision measurement system was built. Different from traditional multi-camera or stereo vision systems, the proposed system has no overlapping field of view, making it difficult to directly establish the relationship between the two telecentric imaging units. To solve this problem, a coaxial alignment method for a dual-field telecentric vision system was proposed. A calibration plate was moved into the fields of view of the two telecentric imaging units in sequence to establish the relationship between them, and a mathematical model for coaxial alignment was built. On this basis, taking the armature assembly as the research object, the main error sources affecting coaxial alignment accuracy were analyzed. Error modeling was carried out based on the Abbe-Bryan principle, and corresponding error compensation methods were proposed. Indentation experiment results show that the coaxial alignment deviations were controlled with-

收稿日期:2026-04-10;修订日期:2026-05-20.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 52275521)

in 5 μm . In addition, press-fitting experiments of the armature assembly further verified the feasibility and effectiveness of the proposed method for precision assembly of shaft-hole components.

Key words: telecentric imaging; precision assembly; error compensation; coaxial alignment; dual-field

1 引言

视觉测量作为一种高效、非接触的测量手段,被广泛应用于精密装配中的同轴检测^[1-2]。在视觉成像系统方面,常用的光学系统主要包括普通镜头和远心镜头,普通镜头在成像过程中存在较大的透视误差与图像畸变,在精密测量的场景中难以保证测量结果的稳定性和准确性^[3-4];相比之下,远心镜头采用平行光路设计,能够有效消除透视误差,也能降低对轴向位移的敏感性,在精密测量场景下具有显著的优势^[5-7]。因此在中小零件精密装配的场景中,尤其是对同轴对准精度要求较高的情况下,远心成像系统成为首选。

近年来,针对基于远心成像的同轴对准方法,已开展了广泛的研究工作。例如:Sun^[8]等通过在远心镜头末端引入分光结构,实现单相机对上下区域的同时观测,从而完成同轴对准;Chen^[9]等和Ye^[10]等也提出了类似的光路设计方法,以实现多区域成像与同轴对准。这类方法都是利用光路分离实现多区域成像。然而,该类方法通常会导致入射光亮度衰减,从而影响成像质量和测量精度;另外,上述研究主要关注光学结构设计或视觉算法,但对于导轨运动误差对同轴对准精度的影响并没有考虑。

为了克服上述问题,部分研究^[11-12]采用双相机或立体视觉系统分别观测不同区域,通过相机标定与多视图融合的方法,建立相机之间的坐标转换关系,从而实现装配对准。例如:Liu^[13]等构建了基于多相机的测量系统,通过相机标定建立坐标转换关系,并结合多视角位姿估计与迭代最近点(Iterative Closest Point, ICP)方法,实现对组件相对位姿的测量与装配;Tian^[14]等提出一种多相机的立体校准方法,通过采用张正友标定法对各相机参数进行标定,并结合亚像素边缘提取与LM算法对相机参数进行优化,从而提高了装配精度。上述研究方法都依赖于相机之间存在重叠视野,但在面对同轴对准的场景时,上、下两个

方向上的待检测零件分别需要由两个相机独立观察,且二者之间不存在公共视野。针对这个问题,娄志峰^[15]等采用压印法,通过压头在零件表面形成压印,使上、下相机分别提取对应特征点,以建立同轴对准关系。然而,该标定方法所得结果仅适用于单一型号,难以满足多型号同轴对准的应用需求。因此对于这种无公共视野的双相机成像结构,二者之间的坐标转换关系难以直接建立,给同轴对准带来挑战。

针对上述问题,本文研究了一种基于双相机视觉系统的同轴对准方法。通过驱动标定板在空间中的运动,建立两个相机之间的坐标转换关系,从而构建同轴对准模型。然而,标定板在运动过程中不可避免地引入额外的位姿误差。为此,在所建立的同轴对准模型的基础上,引入阿贝-布莱恩原理,对影响同轴对准精度的运动误差进行建模分析,并提出相应的误差补偿策略。实验结果表明,该方法能够实现高精度的同轴对准。

2 组件装配系统与测量模型

2.1 测量场景描述与装配系统构型

本文以衔铁组件为应用背景。其中,组件由衔铁、弹簧管和反馈杆组成,各个零件之间均采用过盈配合的方式连接,对零件间孔轴对准精度要求较高。目前,这类组件主要依赖特定工装实现同轴对准,但受加工误差和定位精度限制,易产生对准偏差,影响最终的装配质量^[16-17]。

基于衔铁组件的结构特征,构建了过盈组件装配系统,如图1所示。过盈组件装配系统主要由视觉测量模块、位姿调整模块、零件夹持与定位模块以及压装作业模块组成。其中零件夹持与定位模块用于实现零件的定位和固定;压装作业模块通过伺服电机驱动螺旋推杆,驱动装配平台完成装配工作;视觉测量模块负责获取零件间的相对位置;位姿调整模块根据测量结果进行实时调整与补偿,以保证装配精度。

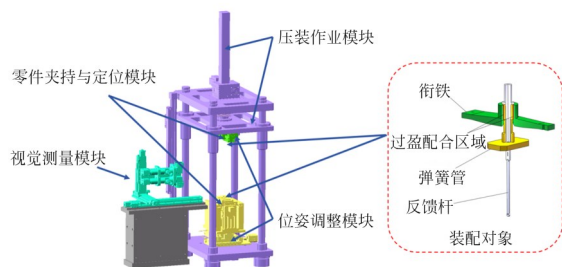


图1 过盈组件装配系统

Fig. 1 Interference fit assembly system

2.2 同轴对准测量原理

视觉测量模块由远心视觉系统和相机运动平台组成。远心视觉系统原理如图2所示,远心视觉系统由两套单目远心成像单元组成,每套远心成像单元都搭配远心镜头,并在镜头末端设置直角棱镜,使进入相机内部的光路由原本的水平方向转变为竖直方向,实现上下视野图像的同轴性;远心视觉系统安装在相机运动平台上,在检测时移动到指定位置进行位姿对准。

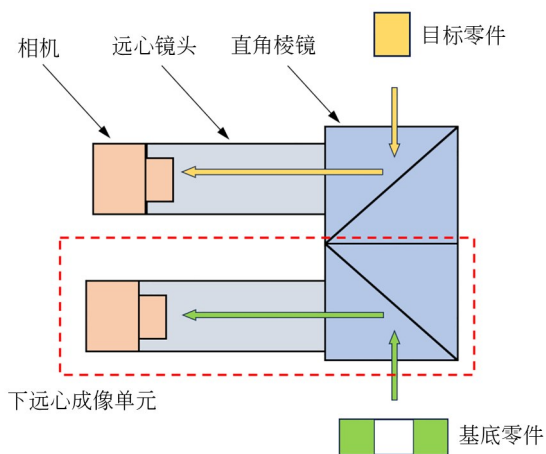


图2 远心视觉系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the telecentric vision system

然而,由于远心视觉系统的上下成像单元不存在公共视野,无法直接建立零件之间的空间位置关系,因此难以实现同轴性判定与位置补偿。为解决这一问题,如图3所示,本文通过引入中间变量作为媒介,建立远心视觉系统中各坐标系之间的转换关系。基于该转换关系,可将零件之间的位置信息统一到同一坐标系下,从而获得两者之间的相对位置关系,并将该位置信息反馈至控

制系统,驱动位姿调整模块进行相应的位置补偿,从而实现同轴对准。

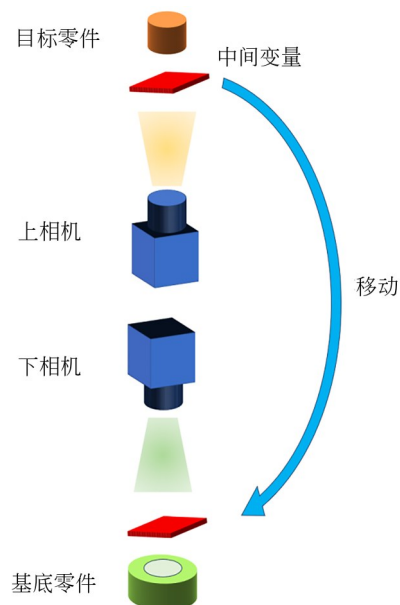


图3 同轴对准原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the coaxial alignment principle

3 同轴对准误差分析与补偿策略

3.1 单目远心成像单元标定方案

对于远心镜头而言,其放大倍率不会随着工作距离的变化而变化,因此在不考虑镜头畸变的时候,令 $(X_w, Y_w, Z_w, 1)$ 和 $(u, v, 1)$ 分别为世界坐标系和像素坐标系下的齐次坐标,根据仿射模型,远心镜头的线性几何模型可以表示为^[18]:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{m}{du} & 0 & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{m}{dv} & 0 & v_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: m 是远心镜头的有效放大倍率, du 、 dv 分别为像素坐标系中 u 和 v 两个方向的像元尺寸, R 和 t 为世界坐标系到相机坐标系的旋转和平移变

$$\text{换}, R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, t = [t_x \quad t_y \quad t_z]^T, (u_0, v_0)$$

为主点坐标。

单目远心成像单元的参数标定采用袁竞^[19]等提出的基于亚像素边缘检测的标定方法。

3.2 上、下远心成像单元位姿转换关系标定

在远心视觉系统的设计中,由于两套远心成像单元的视野并不具备重叠区域,因此无法直接建立联系。如图4所示,本文通过将标定板固定在装配平台上,令标定板依次进入两个远心成像单元的视野范围内,并结合公式(1)的远心镜头几何模型,可分别得到上、下远心成像单元中像素坐标系与标定板坐标系的坐标转换关系:

$$\begin{bmatrix} u_{up} \\ v_{up} \\ 1 \end{bmatrix} = K_{up} T_{up}^{B^u} \begin{bmatrix} X_{B^u} \\ Y_{B^u} \\ Z_{B^u} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} u_{down} \\ v_{down} \\ 1 \end{bmatrix} = K_{down} T_{down}^{B^d} \begin{bmatrix} X_{B^d} \\ Y_{B^d} \\ Z_{B^d} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中:\$(u_{up}, v_{up})\$为上远心成像单元的像素坐标, \$(u_{down}, v_{down})\$为下远心成像单元的像素坐标, \$(X_{B^u}, Y_{B^u}, Z_{B^u})\$为特征点在标定板坐标系\$\{B_u\}\$的位置坐标, \$(X_{B^d}, Y_{B^d}, Z_{B^d})\$为特征点在标定板坐标系\$\{B_d\}\$的位置坐标。\$K_{up}, K_{down}\$分别为上、下远心成像单元的内参矩阵, \$T_{up}^{B^u}, T_{down}^{B^d}\$分别为不同位置处的标定板坐标系到相机坐标系的变换矩阵, 包含旋转矩阵和平移向量。

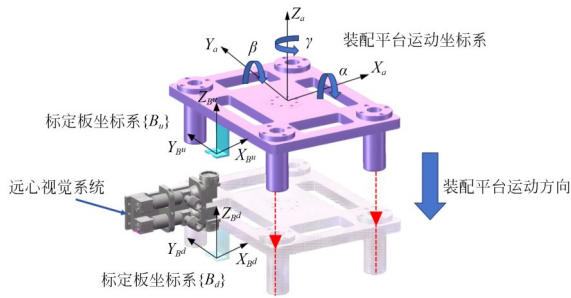


图4 远心视觉系统标定模型

Fig. 4 Calibration model of the telecentric vision system

由于装配平台在实际运动中存在运动误差, 导致了标定板在两个位置下的位姿存在差异。其数学模型可表示为:

$$\begin{bmatrix} X_{B^u} \\ Y_{B^u} \\ Z_{B^u} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_u^d & T_u^d \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{B^d} \\ Y_{B^d} \\ Z_{B^d} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: \$R_u^d, T_u^d\$ 分别为两个标定板坐标系之间的旋

转矩阵和平移向量, \$R_u^d = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 1 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{bmatrix}\$,

\$T_u^d = [\alpha x \ \sigma y \ \sigma z]^T\$, \$\alpha, \beta, \gamma\$ 分别为装配平台的俯仰角、偏摆角以及滚动角, \$\alpha x, \sigma y, \sigma z\$ 分别为两个直线度误差与定位误差^[20-21]。

联立公式(2)、公式(3)以及公式(4), 可以得到两个相机之间的坐标转换关系:

$$\begin{bmatrix} u_{down} \\ v_{down} \\ 1 \end{bmatrix} = K_{down} T_{down}^{B^d} \begin{bmatrix} R_u^d & T_u^d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} T_{up}^{B^u-1} K_{up}^{-1} \begin{bmatrix} u_{up} \\ v_{up} \\ 1 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} u_{up} \\ v_{up} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中, \$C\$ 为两套远心成像单元之间的转换矩阵。

3.3 标定工位与检测工位偏差引入的误差分析

受设备整体结构的限制, 远心视觉系统无法在实际检测的位置通过标定板直接完成标定, 因此在标定的过程中引入了两个问题:

(1) 检测工位和标定工位不在同一个位置, 装配平台的角度误差在不同位置处会引入额外的误差。

(2) 相机运动平台存在运动误差, 当远心视觉系统由标定工位移动至检测工位时, 其空间姿态可能发生改变。

3.3.1 装配平台的运动误差

为便于分析误差传递关系, 基于阿贝-布莱恩原理^[22-23], 对系统几何关系进行统一定义: 如图5所示, 以标定工位为测量点, 检测工位为功能点, 标定工位与检测工位在空间上存在偏距 \$L = [L_{bx}, L_{by}, L_{bz}]^T\$。当装配平台存在姿态角误差时, 将通过该偏距引入附加位置误差:

$$\sigma = \theta \times L, \quad (6)$$

其中, \$\theta = [\alpha, \beta, \gamma]^T\$ 为姿态角误差向量。此外, 由于远心视觉系统采用远心镜头, 其对光轴方向 (\$Z_a\$ 方向) 上的位移变化不敏感, 因此装配平台在该方向上的定位误差对测量结果影响较小, 可忽略不计。在此基础上, 直线度误差可以表示为:

$$\begin{cases} \sigma x = Ex + \beta L_{bz} - \gamma L_{by} \\ \sigma y = Ey - \alpha L_{bz} + \gamma L_{bx} \end{cases}, \quad (7)$$

其中: E_x, E_y 分别为装配平台沿 X_a 轴和 Y_a 轴两个方向的直线度误差, L_{bx}, L_{by} 分别为功能点到测量点沿 X_a 轴和 Y_a 轴两个方向的距离。

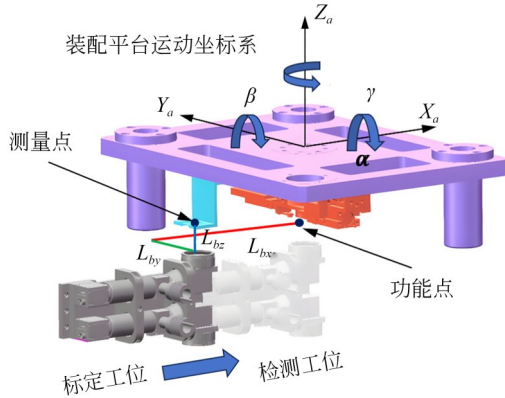


图5 装配平台运动误差原理图

Fig. 5 Schematic diagram of motion errors of the assembly platform

当远心视觉系统分别位于检测工位和标定工位时,需要分析装配平台由于两工位位置不一致而引入的额外运动误差;其余误差可直接融入标定参数的求解过程,从而简化测量与标定流程。

在远心视觉系统进行标定或检测的过程中,装配平台运动的起点与终点保持一致,结合公式(7),可得到由于工位位置不一致引入的额外运动误差为:

$$\begin{cases} \sigma x_{\text{extra}} = \beta L_{bz} - \gamma L_{by} \\ \sigma y_{\text{extra}} = -\alpha L_{bz} + \gamma L_{bx} \end{cases} \quad (8)$$

由于本文中测量点(标定工位)与功能点(检测工位)仅在 X_a 和 Y_a 方向上存在位置偏差,而在 Z_a 方向不存在高度差,因此根据布莱恩原则,功能点与测量点在 Z_a 方向上的布莱恩偏位为零,即 $L_{bz} = 0$ 。由此可知,在两位置之间的坐标转换过程中,不会引入由俯仰角和偏摆角所导致的附加误差,从而减少由测量设备引入的额外测量误差,简化测量流程及误差分析模型。

然而,在实际的装配设备中,标定工位与检测工位之间可能存在微小的 Z 向偏移,即 $L_{bz} \neq 0$ 。在此情况下,根据阿贝-布莱恩原理,俯仰角误差 α 和偏摆角误差 β 将通过 Z 向偏距引入额外的直线度误差。从量级上来看, Z 向偏移通常处于毫米量级,而姿态角误差一般在角秒量级(约 10^{-5} rad)。因此,由该项引入的附加误差通常处于亚微米量级,对系统整体微米级同轴对准精度的影响较小。在合理控制装配与安装精度的前提下,这项误差可忽略不计。

在该条件下,标定工位与检测工位之间仅需考虑由滚动角引入的附加直线度误差:

$$\begin{cases} \sigma x_{\text{extra}} = -\gamma L_{by} \\ \sigma y_{\text{extra}} = \gamma L_{bx} \end{cases} \quad (9)$$

3.3.2 相机运动平台的运动误差

如图6所示,将远心视觉系统视为刚体时,直线度误差与偏摆角误差 θ_y 仅引起系统的整体平移或绕光轴方向旋转,对同轴对准结果影响较小,可忽略不计;而俯仰角误差 θ_p 与滚动角误差

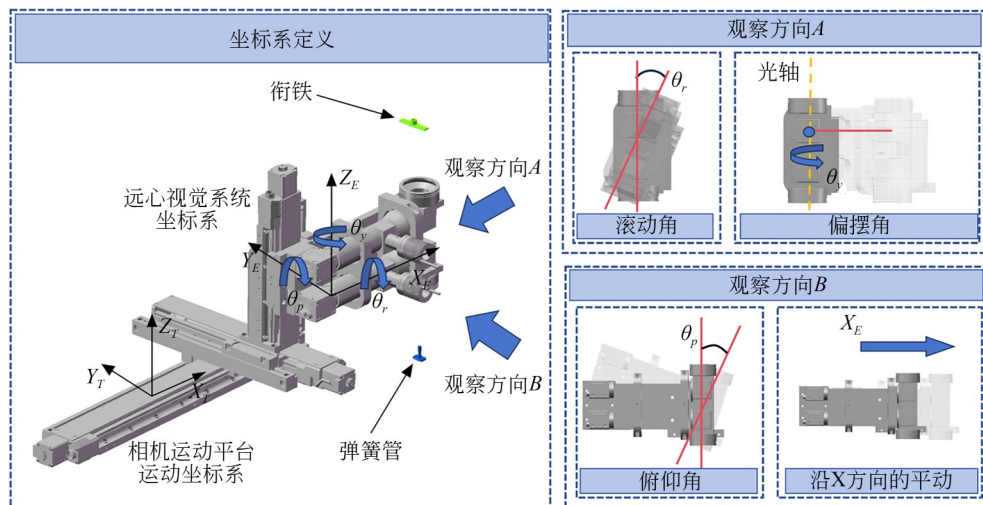


图6 相机运动平台的运动误差对远心视觉系统的影响

Fig. 6 Influence of motion errors of the camera motion platform on the telecentric vision system

θ_r 会改变成像平面的空间姿态,直接影响同轴对准精度。因此,在后续误差分析中,仅考虑末端结构(即远心视觉系统)产生的俯仰角误差与滚动角误差对同轴对准精度的影响。

为定量分析远心视觉系统姿态变化,需要对相机运动平台的运动误差进行误差传递分析。由于制造和装配误差的存在,相机运动平台存在 21 项运动误差,具体误差项如表 1 所示。

在相机运动平台的空间误差测量中,本文基于阿贝-布莱恩原则进行误差建模^[24],如图 7 所

表 1 相机运动平台运动误差表达式

Tab.1 Motion error expressions of the camera motion platform

轴 运动误差	X 轴	Y 轴	Z 轴
定位误差	$\delta_{x_T}(x)$	$\delta_{y_T}(y)$	$\delta_{z_T}(z)$
水平直线度误差	$\delta_{y_T}(x)$	$\delta_{x_T}(y)$	$\delta_{x_T}(z)$
竖直直线度误差	$\delta_{z_T}(x)$	$\delta_{z_T}(y)$	$\delta_{y_T}(z)$
偏摆角误差	$\epsilon_{z_T}(x)$	$\epsilon_{z_T}(y)$	$\epsilon_{y_T}(z)$
俯仰角误差	$\epsilon_{y_T}(x)$	$\epsilon_{x_T}(y)$	$\epsilon_{x_T}(z)$
滚动角误差	$\epsilon_{x_T}(x)$	$\epsilon_{y_T}(y)$	$\epsilon_{z_T}(z)$
垂直度误差	$\alpha_{x_T y_T}$	$\alpha_{x_T z_T}$	$\alpha_{y_T z_T}$

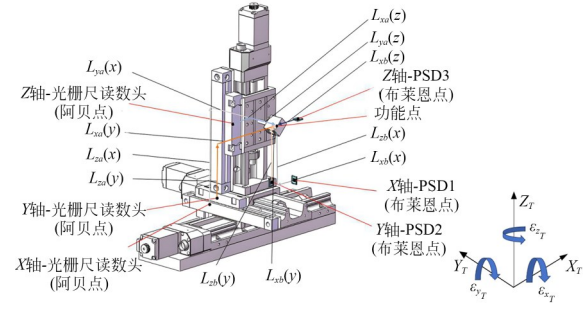


图 7 阿贝-布莱恩误差示意图

Fig. 7 Abbe-Bryan error schematic (camera motion platform X-axis)

示。X 轴上各传感器测得的定位误差和直线度误差经阿贝-布莱恩原则处理后如公式(10)所示:

$$\begin{cases} E_{x_T}(x) = \delta_{x_T}(x) + \epsilon_{y_T}(x) \cdot L_{za}(x) - \epsilon_{z_T}(x) \cdot L_{ya}(x) \\ E_{y_T}(x) = \delta_{y_T}(x) - \epsilon_{x_T}(x) \cdot L_{za}(x) + \epsilon_{z_T}(x) \cdot L_{xa}(x) \\ E_{z_T}(x) = \delta_{z_T}(x) + \epsilon_{x_T}(x) \cdot L_{yb}(x) - \epsilon_{y_T}(x) \cdot L_{xb}(x) \end{cases} \quad (10)$$

导轨 Y 轴和 Z 轴误差在原有的线性误差和角度误差基础上,还需考虑与导轨之间的垂直度误差,误差处理如公式(11)和公式(12)所示:

$$\begin{cases} E_{x_T}(y) = \delta_{x_T}(y) + \epsilon_{y_T}(y) \cdot L_{zb}(y) - \epsilon_{z_T}(y) \cdot L_{yb}(y) - \alpha_{x_T y_T} \cdot L_{y_T} \\ E_{y_T}(y) = \delta_{y_T}(y) - \epsilon_{x_T}(y) \cdot L_{za}(y) + \epsilon_{z_T}(y) \cdot L_{xa}(y) \\ E_{z_T}(y) = \delta_{z_T}(y) + \epsilon_{x_T}(y) \cdot L_{yb}(y) - \epsilon_{y_T}(y) \cdot L_{xb}(y) \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} E_{x_T}(z) = \delta_{x_T}(z) + \epsilon_{y_T}(z) \cdot L_{zb}(z) - \epsilon_{z_T}(z) \cdot L_{yb}(z) - \alpha_{x_T z_T} \cdot L_{z_T} \\ E_{y_T}(z) = \delta_{y_T}(z) - \epsilon_{x_T}(z) \cdot L_{za}(z) + \epsilon_{z_T}(z) \cdot L_{xa}(z) - \alpha_{y_T z_T} \cdot L_{z_T} \\ E_{z_T}(z) = \delta_{z_T}(z) + \epsilon_{x_T}(z) \cdot L_{yb}(z) - \epsilon_{y_T}(z) \cdot L_{xb}(z) \end{cases} \quad (12)$$

由此可得竖直轴功能点运动位置误差为:

$$\begin{cases} E_{x_T}(x, y, z) = E_{x_T}(x) + E_{x_T}(y) + E_{x_T}(z) \\ E_{y_T}(x, y, z) = E_{y_T}(x) + E_{y_T}(y) + E_{y_T}(z) \\ E_{z_T}(x, y, z) = E_{z_T}(x) + E_{z_T}(y) + E_{z_T}(z) \end{cases} \quad (13)$$

其中: $L_{ya}(x), L_{za}(x), L_{xb}(x), L_{yb}(x), L_{zb}(x)$ 为 X 轴上的阿贝偏位和布莱恩偏位, $L_{xa}(y), L_{ya}(y), L_{xb}(y), L_{yb}(y), L_{zb}(y)$ 为 Y 轴上的阿贝偏位和布莱恩偏位, $L_{xa}(z), L_{ya}(z), L_{xb}(z), L_{yb}(z), L_{zb}(z)$ 为 Z 轴上的阿贝偏位和布莱恩偏位, L_{y_T}, L_{z_T} 分别为 Y 轴和 Z 轴的运动距离。

如图 8 所示,在 $X_T O_T Z_T$ 平面内定义 2 个功能

点 A, B。其中 AB 两点连线构成基线 L_{ab} , 代表远心视觉系统的光轴。

通过阿贝-布莱恩误差传递关系,将导轨各项运动误差传递至功能点 A, B, 得到两个功能点分别在 X_T, Y_T, Z_T 方向上的位置偏差。由于将远心视觉系统视为刚体,因此基线 L_{ab} 保持不变,系统的俯仰角误差 θ_p 和滚动角误差 θ_r 可由两功能点位置误差的差值确定:

$$\begin{cases} \sin \theta_p = \frac{E_{x_T}^A(x, y, z) - E_{x_T}^B(x, y, z)}{L_{ab}} \\ \sin \theta_r = \frac{E_{y_T}^A(x, y, z) - E_{y_T}^B(x, y, z)}{L_{ab}} \end{cases} \quad (14)$$

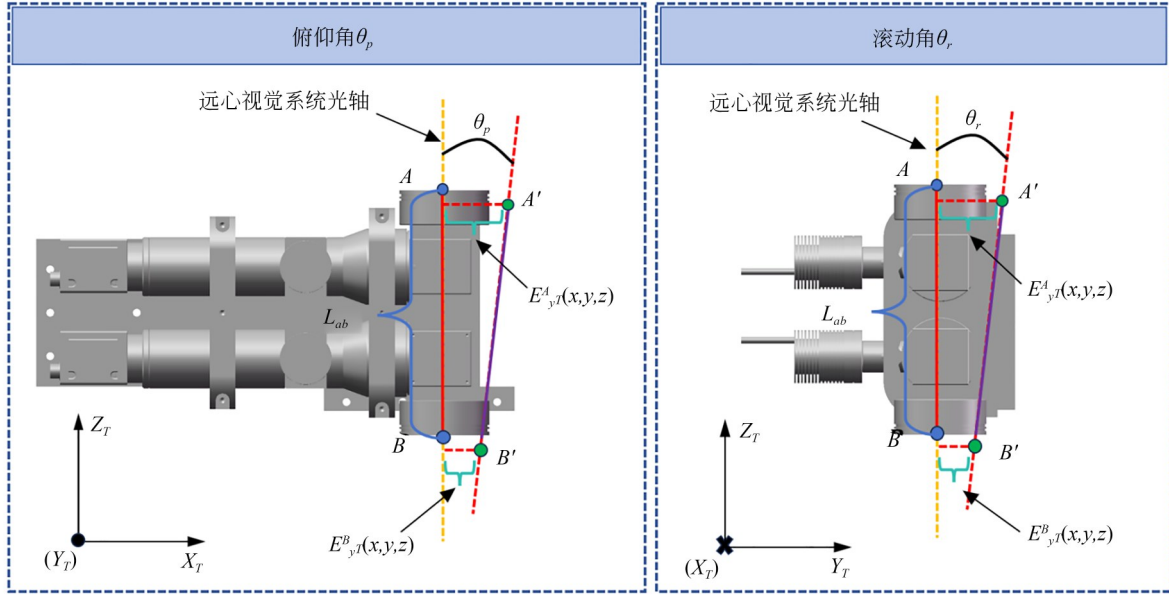


图 8 影响光轴角度的误差辨识

Fig. 8 Identification of errors affecting the optical axis angle

由于俯仰角和滚动角通常很小,公式(14)可以简化为:

$$\begin{cases} \theta_p = \frac{E_{x^T}^A(x, y, z) - E_{x^T}^B(x, y, z)}{L_{ab}} \\ \theta_r = \frac{E_{y^T}^A(x, y, z) - E_{y^T}^B(x, y, z)}{L_{ab}} \end{cases} \quad (15)$$

如图 9 所示,由于远心镜头的工作距离近乎恒定,因此上、下远心成像单元环形光源到测量平面的距离是固定的,均设定为 h ,远心视觉系统的高度为 t 。当系统存在俯仰角误差 θ_p 时,由于

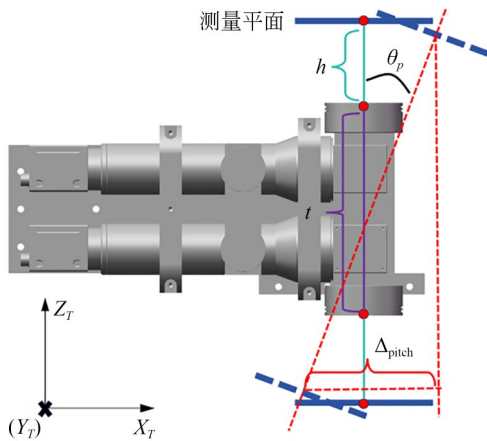


图 9 俯仰角误差对同轴对准的影响

Fig. 9 Influence of pitch angle error on coaxial alignment

成像平面产生倾斜,导致测量平面在空间位置上的附加投影偏移,其引入的同轴对准误差近似为:

$$\Delta_{pitch} \approx (2h + t)\theta_p. \quad (16)$$

同理,当系统存在滚动角误差 θ_r 时,其引入的同轴对准误差近似为:

$$\Delta_{roll} \approx (2h + t)\theta_r. \quad (17)$$

因此,由于相机运动平台的运动误差导致的同轴对准误差可表示为:

$$\Delta \approx (2h + t)\sqrt{\theta_p^2 + \theta_r^2}. \quad (18)$$

3.4 同轴误差补偿的策略

在同轴对准的控制策略中,当远心视觉系统运动至检测工位后,系统的位置保持不动,上、下远心成像单元同时进行图像采集和特征提取,并将上远心成像单元提取的特征信息转换至下远心成像单元的像素坐标系中,此时即可得到像素偏差量,后续通过 XY 精密调整平台进行调整。

$$\begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{down} \\ v_{down} \end{bmatrix} - C \begin{bmatrix} u_{up} \\ v_{up} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

其中, $(\Delta u, \Delta v)$ 为像素偏差量。

目前存在两个问题:

(1) 基于 3.3.2 节对装配平台运动误差的分析,公式 5 中已包含对装配平台自身运动误差的补偿,但并没有补偿相机运动平台的运动误差。

(2) 另外,公式 (19) 中得到的像素偏差

$(\Delta u, \Delta v)$ 并没有转换为XY精密调整平台的实际位移量,虽然这个问题不会影响系统的最终对准精度,但会在一定程度上降低对准过程的效率。

3.4.1 像素偏差与XY精密调整平台位移的映射关系

如图10所示,将标定板固定于XY精密调整平台上,控制XY精密调整平台在其工作平面内进行微小位移,同时利用下远心成像单元观测标定板特征点的位置变化。通过分析位移前后的变化量,可建立像素偏差与XY精密调整平台之间的运动映射关系。

$$\begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} = J_{\text{image} \leftarrow XY} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}, \quad (20)$$

其中: $(\Delta x, \Delta y)$ 表示XY精密调整平台在其自身坐标系下沿 X_D 方向和 Y_D 方向的位移调整量。 $J_{\text{image} \leftarrow XY}$ 为下远心成像单元与XY精密调整平台之间的局部映射矩阵。

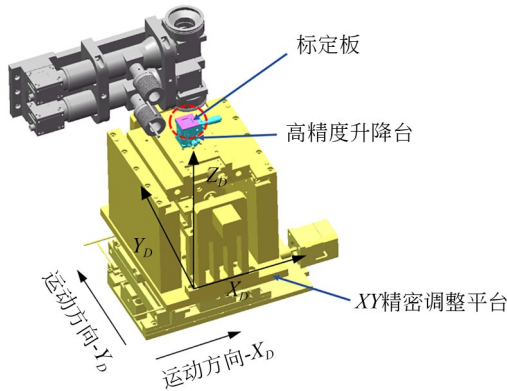


图10 像素偏差与调整平台位移映射关系的标定原理图
Fig. 10 Schematic diagram of calibration of the mapping between pixel deviation and adjustment platform displacement

3.4.2 相机运动平台运动误差的补偿

为实现对相机运动平台运动误差的补偿,还需确定相机运动平台坐标系与XY精密调整平台坐标系之间的映射关系,将公式(18)中的同轴对准误差通过XY精密调整平台直接补偿。

基于3.4.1节中获取下远心成像单元与XY精密调整平台之间运动映射关系的方法,本节采用相同的思路建立下远心成像单元与相机运动平台之间的运动映射关系。

将标定板固定于XY精密调整平台上,通过

控制相机运动平台在检测工位所在的 $X_T O_T Y_T$ 平面内进行微小位移,同时利用下远心成像单元观测标定板特征点的位置变化。通过分析位移前后特征点位置的变化量,可以建立下远心成像单元与相机运动平台之间的运动映射关系。

$$\begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} = J_{\text{image} \leftarrow \text{pre}} \begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \end{bmatrix}, \quad (21)$$

其中: $(\Delta x', \Delta y')$ 表示相机运动平台在其自身坐标系下沿 X_T 方向和 Y_T 方向的位移增量。 $J_{\text{image} \leftarrow \text{pre}}$ 为下远心成像单元与相机运动平台之间的映射矩阵。

结合公式(20)和公式(21),可以得到XY精密调整平台与相机运动平台之间的映射关系:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = J_{\text{image} \leftarrow XY}^{-1} J_{\text{image} \leftarrow \text{pre}} \begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \end{bmatrix}. \quad (22)$$

结合公式(20)和公式(22),可以得到XY精密调整平台调整补偿的数学模型为:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = J_{\text{image} \leftarrow XY}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} + J_{\text{image} \leftarrow XY}^{-1} J_{\text{image} \leftarrow \text{pre}} \begin{bmatrix} \pm \Delta_{\text{roll}} \\ \pm \Delta_{\text{pitch}} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

4 标定实验

为验证所提出的标定方法的有效性,搭建的远心视觉系统中两个相机都采用大恒的ME2P-2621-15U3M(分辨率:5120×5120,像元尺寸:2.5 μm)、视清科技的远心镜头WWK10-110CP-111V3(物方远心镜头,DOF:±0.3 mm,放大倍率:1×),采用包含49个特征点(直径:0.625 mm,圆心间距离:1.25 mm)的玻璃标定板。

4.1 远心成像单元内参标定实验

如图11所示,本次实验中,上、下远心成像单元分别采集标定板图像30张,共提取有效特征点1490个,结果如表2所示。为了评价所提出标定方法的准确性,计算了系统的重投影误差。结果表明,上、下相机标定结果的平均重投影误差分别为0.152 pixels和0.182 pixels。结合本系统像元尺寸2.5 μm换算,该误差对应的实际距离分别约为0.4 μm和0.5 μm。该量级远小于系统的装配公差预算,表明标定精度满足作为系统误差源的基础要求。

表 2 远心成像单元标定结果

Tab. 2 Calibration results of the telecentric imaging unit

远心成像单元	放大倍率/m	主点坐标(u_0, v_0)	畸变系数[k_1, k_2, p_1, p_2]	重投影误差 /pixel
上远心成像单元	0.999 553	(2 560.00, 2 560.01)	$10^{-6}[-1.314, 0.165, -4.671, 2.985]$	0.152
下远心成像单元	1.001 067	(2 560.00, 2 560.00)	$10^{-5}[1.035, -0.004, 0.855, 0.203]$	0.182

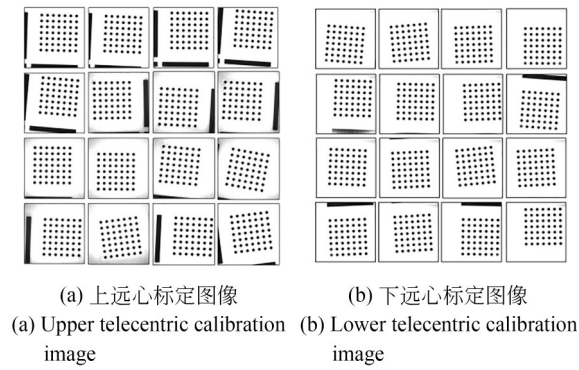


图 11 内参标定板图像采集示意图
Fig. 11 Schematic diagram of image acquisition for the intrinsic calibration board

4.2 远心视觉系统位姿转换关系标定实验

4.2.1 上、下远心成像单元坐标转换标定实验

将标定板固定于装配平台,并保持远心视觉系统的位姿不变,随后驱动装配平台,依次将标定板调整至上、下远心成像单元的视场范围内,

并分别采集标定板图像,如图 12 所示。通过对采集的标定图像计算,可以分别得到上、下远心成像单元坐标系与标定板坐标系之间的坐标转换矩阵参数,结果如表 3 所示。

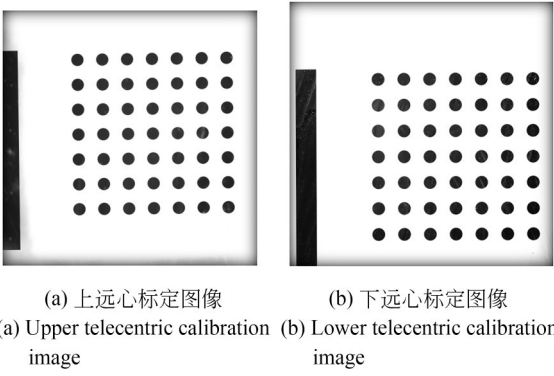


图 12 外参标定板图像采集示意图
Fig. 12 Schematic diagram of image acquisition for the extrinsic calibration board

表 3 远心成像单元与标定板坐标系的变换参数

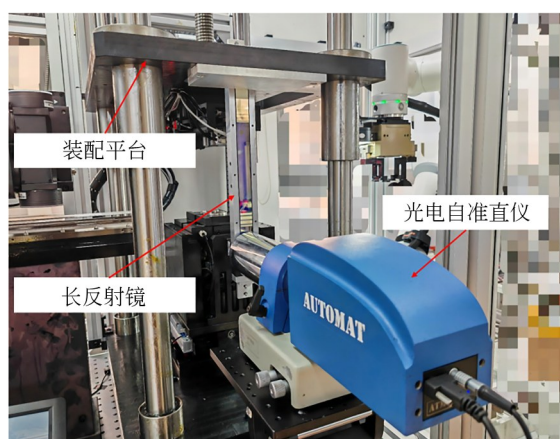
Tab. 3 Transformation parameters between the telecentric imaging unit and the calibration board coordinate system

成像单元	标定板坐标系	旋转矩阵 R	平移向量 t /mm
上远心成像单元	标定板坐标系 $\{B_u\}$	$R_{up}^{B^*} = \begin{bmatrix} 0.999\ 900 & 0.014\ 150 & 0.000\ 045 \\ -0.014\ 150 & 0.999\ 900 & 0 \\ -0.000\ 045 & -0.000\ 001 & 1 \end{bmatrix}$	$t_{up}^{B^*} = \begin{bmatrix} -2.643\ 6 \\ -3.922\ 9 \\ 0 \end{bmatrix}$
下远心成像单元	标定板坐标系 $\{B_d\}$	$R_{down}^{B^*} = \begin{bmatrix} 0.999\ 988 & 0.004\ 870 & -0.000\ 005 \\ -0.004\ 870 & 0.999\ 988 & 0.000\ 005 \\ 0.000\ 005 & -0.000\ 005 & 1 \end{bmatrix}$	$t_{down}^{B^*} = \begin{bmatrix} -2.111\ 8 \\ -2.639\ 2 \\ 0 \end{bmatrix}$

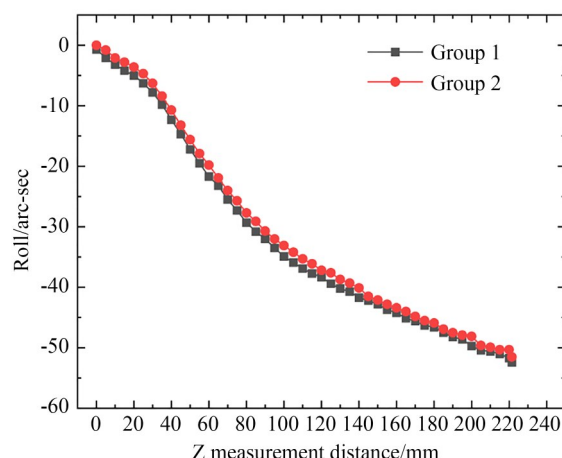
4.2.2 运动误差的测量

如图 13(a)所示,对于装配平台的滚动角误差,采用商用光电自准直仪(5000U3050, AutoMat, China)结合长反射镜的方法进行测量^[25]。测量过程中,将长反射镜沿装配平台竖直运动方向布置,并保持自准直仪位置固定不变。测量结果如图 13(b)所示。在装配平台移动 230 mm 的

行程范围内,滚动角最大值为 52.4"。为验证测量结果的重复性,进行了一次重复测量,结果表明,在相同位置处的滚动角最大偏差不超过 2",说明该测量方法具有良好的重复性。在此基础上,通过确定装配平台分别位于上、下远心成像单元采集标定图像时对应的位置,计算两位置处的滚动角差值,并将其代入公式(9)中,即可得到



(a) 测量设备搭建
(a) Setup of the measurement system



(b) 测量结果
(b) Measurement results

图 13 装配平台滚动角测量

Fig. 13 Measurement of the assembly platform roll angle

由装配平台滚动角引入的附加直线度误差。

为了简化测量流程并避免引入额外的测量误差,针对远心视觉系统的俯仰角和滚动角误差,本文采用商用水平仪(WL/AL11, Qianshao, China)对末端机构(远心视觉系统)的姿态角进行直接测量^[26]。通过多次重复测量并取平均值,以提高测量结果的可靠性与稳定性。测量结果表明,在远心视觉系统由标定工位移动至检测工位的过程中,其俯仰角偏差为49.45",滚动角偏差为3.3"。

4.2.3 同轴对准误差的补偿

为建立XY精密调整平台与下远心成像单元之间的运动映射关系,基于3.4.1节提出的方法开展标定实验。实验中,将标定板固定于XY精密调整平台上,并保持下远心成像单元的位姿恒定不变。在此基础上,驱动XY精密调整平台在 X_D 、 Y_D 方向分别施加位移,同步采集下远心成像单元中标定板特征点对应的像素坐标变化数据。通过对位移前后特征点像素偏差与平台实际位移之间的关系进行线性回归拟合,从而建立下远心成像单元与XY精密调整平台之间的映射关系。

标定完成后,可得到对应的局部映射矩阵为:

$$J_{\text{image} \leftarrow XY} = \begin{bmatrix} 405.98 & 3.36 \\ -3.84 & 398.49 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

同理,对于相机运动平台与下远心成像单元

之间的运动映射关系,则通过固定XY精密调整平台,驱动相机运动平台运动,后续采用相同方法进行标定获得,最终得到的局部映射矩阵为:

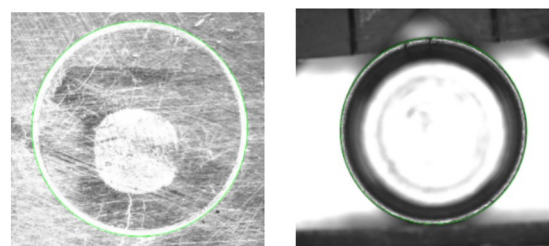
$$J_{\text{image} \leftarrow \text{pre}} = \begin{bmatrix} -397.33 & -3.39 \\ 4.05 & -397.96 \end{bmatrix}. \quad (25)$$

为评估映射关系的拟合质量,对标定数据进行了线性回归分析。结果表明,公式(24)和公式(25)中相对应的回归模型决定系数 $R^2 > 0.99$,表明模型具有良好的线性拟合能力。其中,该映射关系基于局部线性假设,仅在小范围位移内有效。

5 验证实验

5.1 对准精度验证

如图14所示,为验证远心视觉系统的同轴对准精度,本文采用压印法进行实验验证^[15]。实验



(a) 环形压印
(a) Annular embossing
(b) 环形压头
(b) Annular pressing head

图 14 实验图像

Fig. 14 Experiment images

中将经研磨膏研磨后的光滑标定铝板固定在XY精密调整平台上,通过装配平台驱动压头缓慢下压,使其与铝板接触并施加适当压力,形成环形压印。

在采集的图像中,压头与环形压印的圆心相对位置能够反映系统在实际对准过程中的相对

位姿偏差。首先,将上远心成像单元获取的压头圆心坐标,依据公式(5)映射至下远心成像单元的像素坐标系;随后,根据公式(21)对相机运动平台的运动误差进行补偿;最后,将补偿后的结果与下远心成像单元测得的环形压印圆心坐标进行对比分析。测量结果如表4所示。

表 4 图像采集相对位置对比结果

Tab. 4 Comparison results of relative positions in image acquisition

环形印记 圆心坐标/pixel	环形压头 圆心坐标/pixel	经坐标转换和补偿后 圆心坐标/pixel	偏差/ μm
(2 876. 843, 2 551. 185)	(2 661. 531, 2 018. 391)	(2 875. 487, 2 549. 320)	(3. 4, 4. 7)
(2 338. 388, 2 587. 807)	(2 133. 678, 2 068. 248)	(2 337. 945, 2 587. 330)	(1. 1, 1. 2)
(1 547. 608, 2 114. 409)	(1 339. 429, 1 602. 735)	(1 546. 797, 2 113. 761)	(2. 0, 1. 6)
(2 560. 942, 2 986. 758)	(2 359. 256, 2 463. 312)	(2 560. 188, 2 985. 103)	(1. 9, 4. 1)
(2 874. 568, 3 112. 879)	(2 673. 436, 2 586. 752)	(2 873. 712, 3 111. 677)	(2. 1, 3. 0)
(2 483. 871, 3 463. 157)	(2 284. 823, 2 936. 927)	(2 482. 422, 3 461. 968)	(3. 6, 3. 0)
(2 940. 017, 2 968. 954)	(2 735. 162, 2 438. 693)	(2 938. 156, 2 967. 187)	(4. 7, 4. 4)

5.2 压装实验验证

为了验证同轴对准方法的可行性和有效性,本文通过衔铁组件压装实验进行了综合评估,实验随机选取了五组衔铁组件,分别执行衔铁-弹簧管和反馈杆-弹簧管的压装流程,同步记录压力-位移数据。

如图15所示,两组压力-位移曲线整体呈现连续、平滑的变化趋势,未出现明显的突变峰值或剧烈波动。在孔轴类过盈配合组件压装过程中,当存在较大的同轴偏差时,通常会导致压装压力异常增大或曲线出现明显波动^[27]。因此,压力-位移曲线的平滑性能够在一定程度上反映装

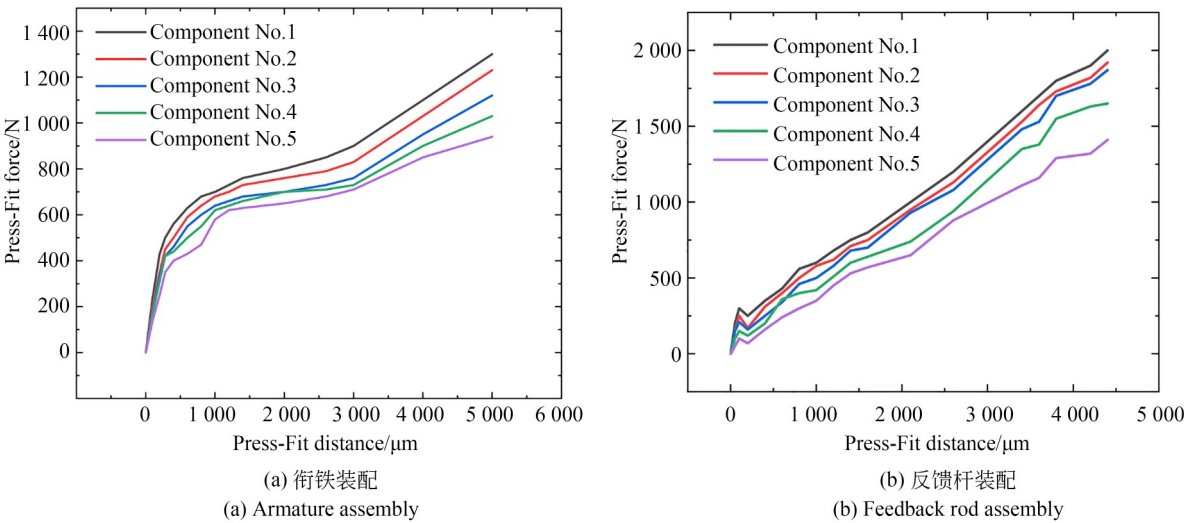


图 15 压力与位移曲线

Fig. 15 Force-displacement curve

配过程的稳定性及接触状态。本文实验结果中未观察到明显异常波动,说明压装过程中未发生显著偏心接触,装配过程较为稳定。从工程应用角度验证了所提出的同轴对准方法的有效性和可行性。

6 结 论

在同轴对准场景中,双相机成像结构通常不存在公共视野,从而导致坐标转换关系难以直接建立。针对这个问题,本文以衔铁组件装配为应用场景,提出了一种基于双视场的远心成像系统的同轴对准方法。该方法通过驱动装配平台,让标定板依次进入上、下远心成像单元的视野范围内,从而建立两个成像单元之间的坐标变换关系,最终将不同视场下的测量信息统一到同一个坐标体系下进行描述。在此基础上,结合阿贝-布莱恩原则,对影响同轴对准精度的各运动轴的误差项进行了分析与建模,明确了主要来源。压印实验结果表明,多组实验中的同轴对准偏差均

控制在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以内,后续通过衔铁组件装配实验,进一步验证了该方法的有效性。

本文方法适用于高精度同轴对准的装配场景。在系统结构稳定且标定精度可控的条件下,可实现微米级对准精度,具有一定工程应用价值。需要指出的是,该方法依赖于误差参数的准确标定,对机械结构的稳定性较为敏感。未来将开展误差参数在线检测以及多传感器融合研究,以提升系统的长期稳定性与对准精度。

作者贡献声明:

焦少伟:测量方法的提出,论文构思和撰写;
黄鹏鹏:实验的设计及数据整理和分析;
杨兴伦:实验数据整理和分析;
裴宇航:方法论的提出,论文修改;
计 韬:测量方法的优化,论文修改;
张记云:论文图表的制作与校对,论文修改;
姜志峰:研究方案统筹,实验指导与数据分析,论文审核。

参考文献:

- [1] SHINDELL O J, CAPPELLERI D J. An automated magnetic micro-robot assembly system[C]. 2025 *International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. July 28-August 1, 2025, West Lafayette, IN, USA. IEEE, 2025: 1-6.
- [2] TIAN W C, ZHANG P C, TIAN M F, et al. Cam design and pin defect detection of cam pin insertion machine in IGBT packaging [J]. *Micromachines*, 2025, 16(7): 829.
- [3] 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.
- [4] 郝飞,焦云东,孙佳浩,等. 正交远心机器视觉测量方法及其系统与应用[J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46(9): 125-133.
- HAO F, JIAO Y D, SUN J H, et al. Orthogonal telecentric machine vision measurement method and its system and application [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(9): 125-133. (in Chinese)
- [5] LI L, LI B, SUN Z J, et al. A hybrid optical metrology framework integrating telecentric imaging and an optical micrometer for multi-scale geometric evaluation of aero-engine shafts [J]. *Measurement*, 2026, 262: 120053.
- [6] CHEN W M, WANG H X, TIAN H H, et al. The global pixel size calibration method for a dual telecentric imaging system based on a sphere array [J]. *Measurement*, 2025, 254: 117919.
- [7] WANG K Z, LI Z X, XU L M, et al. Direct measurement and compensation of contour errors for profile grinding[J]. *Measurement*, 2025, 242: 115959.
- [8] SUN W C, ZHANG Z J, ZHANG W M. A coaxial alignment method for large flange parts assembly using multiple local images [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 16716-16727.
- [9] CHEN Z Y, YE X, ZHANG Z J, et al. Vision and force feedback control for microassembly process [J]. *MATEC Web of Conferences*, 2016, 77: 09005.

- [10] YE X, GAO J, ZHANG Z J. A microassembly system with coaxial alignment function [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 487: 678-681.
- [11] YUAN F, XIA Z Y, TANG B J, *et al.* Calibration accuracy evaluation method for multi-camera measurement systems [J]. *Measurement*, 2025, 242: 116311.
- [12] ZHANG X B, LUO L, MA R, *et al.* Binocular stereo vision-based structured light scanning system calibration and workpiece surface measurement accuracy analysis [J]. *Sensors*, 2025, 25(20): 6455.
- [13] LIU Z F, CHEN J Z, CHEN C H, *et al.* Target reconstruction and process parameter decision-making for bolt intelligent assembly based on robot and multi-camera [J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 256: 124871.
- [14] TIAN X, ZHU Y, LI D, *et al.* High-accuracy multi-cameras calibration in constrained assembly spaces: application to wing-fuselage docking of large aircraft [J]. *The Aeronautical Journal*, 2026, 130(1345): 809-833.
- [15] 姜志峰, 王晓东, 由博, 等. 精密微小组件压装技术及仪器 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1605-1611.
- LOU Z F, WANG X D, YOU B, *et al.* Pressing-fitting technology and instrument for precision small parts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1605-1611. (in Chinese)
- [16] ZHANG Z Y, WANG X D, REN T Q, *et al.* Novel gripper module and method for automated assembly of miniature parts [J]. *Advances in Manufacturing*, 2023, 11(2): 295-310.
- [17] SHI M K, ZHANG Z J, ZHANG W M, *et al.* Automatic assembly of micro-miniature parts based on coaxial alignment and ORB feature matching [J]. *MATEC Web of Conferences*, 2021, 336: 02009.
- [18] CHEN Z, LIAO H Y, ZHANG X M. Telecentric stereo micro-vision system: Calibration method and experiments [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 57: 82-92.
- [19] 袁竞, 林虎, 石照耀, 等. 基于亚像素边缘检测融合光照补偿的远心成像标定方法 [J]. *光学精密工程*, 2025, 33(16): 2578-2591.
- YUAN J, LIN H, SHI Z Y, *et al.* Telecentric imaging calibration via integrated sub-pixel edge detection and illumination compensation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(16): 2578-2591. (in Chinese)
- [20] ZHANG J Y, LOU Z F, FAN K C. Accuracy improvement of a 3D passive laser tracker for the calibration of industrial robots [J]. *Robotics and Computer—Integrated Manufacturing*, 2023, 81: 102487.
- [21] 姜志峰, 耿万佳, 张记云, 等. 被动式激光跟踪测量方法及其误差补偿技术 [J]. *计测技术*, 2021, 41(5): 34-41.
- LOU Z F, GENG W J, ZHANG J Y, *et al.* Passive laser tracking measurement method and error compensation technology [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2021, 41(5): 34-41. (in Chinese)
- [22] ABBE E. Messapparate für physiker [J]. *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 1890, 10(12): 446-448.
- [23] BRYAN J B. The Abbé principle revisited: an updated interpretation [J]. *Precision Engineering*, 1979, 1(3): 129-132.
- [24] 赵壮, 姜志峰, 张忠宁, 等. 符合阿贝原则的数控机床几何误差建模 [J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 885-897.
- ZHAO Z, LOU Z F, ZHANG Z N, *et al.* Geometric error model of CNC machine tools based on Abbe principle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(4): 885-897. (in Chinese)
- [25] 姜志峰, 张汉平, 周竞杰, 等. 二维线性模组空间运动误差实时测量 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(21): 3111-3124.
- LOU Z F, ZHANG H P, ZHOU J J, *et al.* Real-time spatial error measurement of two-dimensional linear module [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(21): 3111-3124. (in Chinese)
- [26] ZHANG J Y, LOU Z F, FAN K C, *et al.* Development of a precision vertical planar stage as a programmable planar artefact [J]. *Measurement*, 2023, 217: 113055.
- [27] 龚青山, 徐昊, 郭庆贺, 等. 基于 FTA 的齿轮与轴过盈联接失效影响参数分析 [J]. *制造技术与机*

床, 2022(9): 13-19.

GONG Q S, XU H, GUO Q H, *et al.* FTA-based analysis of the parameters influencing the fail-

ure of gear-shaft interference couplings[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2022(9): 13-19. (in Chinese)

作者简介:



焦少伟(2001—),男,山西晋城人,硕士研究生,2023年于广西大学获得学士学位,现就读于大连理工大学机械工程学院,主要从事微小组件自动装配的研究。E-mail: shao-wei20010701@163.com

通讯作者:



娄志峰(1978—),男,黑龙江肇东人,副教授,1999年、2008年于大连理工大学分别获得学士和博士学位,研究方向为微小组件自动装配技术、数控机床误差测量与补偿技术等。E-mail: louzf@dlut.edu.cn