

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417750

并联机器人非接触式大量程位姿测量系统^{*}

王艺^{1,2} 秦超¹ 徐振邦¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 为满足并联机器人动平台大行程六自由度位姿的非接触式同步测量需求,首先提出了一种由激光器和视觉组件构成的位姿测量系统。该系统通过图像处理技术输出探测面上光斑的二维坐标,利用激光器和视觉组件的配合,实现了并联机器人动平台位姿的精确测量。接着研究了测量系统的解算方法,基于解析几何方法推导了被测目标的位姿。最后,利用高精度并联机器人进行实验测试,结果表明该系统的位置测量均方根误差低于0.1 mm,姿态测量均方根误差低于0.07°,位置测量和姿态测量的平均相对误差分别为0.76%和2.56%。该研究为非接触式大量程位姿测量提供了一种新颖有效的解决方案,在机器人运动控制、精密制造和科学实验等领域具有广泛的应用前景。

关键词: 六自由度位姿测量;并联机器人;非接触式;大量程

中图分类号: TN06; TP212.9 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.2020

Non-contact large-stroke position and attitude measurement system for parallel robots

Wang Yi^{1,2} Qin Chao¹ Xu Zhenbang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To meet the demand for non-contact synchronous measurement of the large-range six-degree-of-freedom pose of a parallel robot's moving platform, a pose measurement system composed of a laser and visual components is proposed. The system utilizes image processing technology to output the two-dimensional coordinates of light spots on the detection surface, achieving precise pose measurement of parallel robot platforms through the cooperation of lasers and vision components. Subsequently, the solution method of the measurement system is studied, and the pose of the target is derived based on analytical geometry methods. Finally, experimental tests are conducted using a high-precision parallel robot. The results indicate that the system achieves a root mean square error of less than 0.1 mm in position measurement and less than 0.07° in attitude measurement. The average relative errors of position and attitude measurements are 0.76% and 2.56%, respectively. This research provides a novel and effective solution for large-stroke pose measurement technology, with broad application prospects in robotic motion control, precision manufacturing, and scientific experiments.

Keywords: 6-DOF position and attitude measurement; parallel robot; non contact; large stroke

0 引言

随着工业自动化和精密制造技术的迅速发展,特别是在并联机器人领域,对末端执行器的位姿测量精度要求日益提高。位姿测量技术,即对物体在三维空间中位置和姿态的精确描述,已成为实现机器人精度校准与运动闭环控制的关键技术之一^[1-3]。

在并联机器人动平台的非接触式六自由度位姿测量领

域,现有技术多采用由二维位置敏感探测器(position sensitive detector, PSD)组成的测量系统,该系统在高精度和实时性等方面具有优势,但由于PSD探测面较小,其在大量程位姿测量中的应用受到限制^[4-6]。因此,亟需研究一种替代PSD的大面积光斑二维坐标探测装置,随着相机技术和图像处理算法的发展,特别是在高分辨率、低畸变和低成本方面的突破,为开发该装置提供了有力支持^[7]。本研究正是基于这一背景,提出了一种结合激光器、探测平板和

相机的视觉组件,由其可构建适用于并联机器人的新型大量程位姿测量系统。

位姿测量系统构建完成后,需研究由测量元件的输出值推导被测目标位姿值的位姿解算方法,国内外已逐步开展了相关探索。例如,Hospodar^[8]提出了基于“Y”字形配置的 3 个 PSD,通过简化运动耦合因素建立了 PSD 测量值与平台位姿间的线性关系;李宗峰^[9]和高玉娥等^[10]研究了“T”字形和正交构型的测量系统,通过简化微小量并采用向量方法推导出位姿与 PSD 测量值的关系;Chen 等^[11]在被测目标上安装棱镜反射激光并利用矢量反射关系,建立了 PSD 测量值与目标位姿间的关系模型,并对其高阶项消去实现了模型线性化。然而,当并联机器人的运动范围增大时,由于解算方法中的简化与近似,位姿解算结果将逐渐偏离真实值^[12],因此,需要对大行程运动建立更精确的系统模型,从而实现位姿值的精确解算。

综上,现有研究多集中于小范围位姿测量,而针对并联机器人大行程运动的位姿测量系统构建方法与位姿解算方法仍待深入研究。本文提出了一种基于视觉组件的非接触式大量程位姿测量系统,并提出了用于位姿解算的精确系统模型建立方法。通过高精度并联机器人提供的理论位姿进行验证,证明了所提方法的有效性与适用性。

1 位姿测量系统的设计与实现

针对并联机器人大行程运动的非接触式大量程六自由度位姿同步测量系统(以下简称位姿测量系统),其结构设计如图 1 所示。激光器固连在并联机器人的动平台上,随动平台运动;视觉组件固定在并联机器人定平台的安装板上,由探测平板、相机和调整支架组成。探测平板的外周为支撑框架,定义其相机一侧为探测面,四角位置设有标定点,支撑框架中心安装有透射幕布用于激光点的透射显示。激光器与对应的视觉组件构成子测量系统,位姿测量系统由 3 套该子测量系统构建。

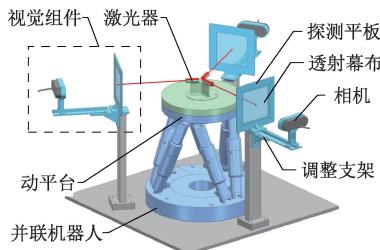


图 1 位姿测量系统结构

Fig. 1 Structure of the pose measurement system

位姿测量系统构建后,需研究相匹配的位姿解算方法,首先,建立由被测目标位姿改变引起视觉组件测量值变化的系统正解模型;然后,逆向解算此模型即可实现由测量值向位姿值的推导。

系统的位姿解算流程如图 2 所示,首先由相机获取视觉组件探测面图像,接着经过图像处理得到标定点与激光

点的像素位置,进一步通过位置解算得到探测面上激光点的位置坐标,从而获得视觉组件输出值 P_s ;当并联机器人处于零位状态时,视觉组件并非零位状态,且实际系统中存在零件的加工误差与安装误差,因此需要通过装调检测进行系统级的精度校准和视觉组件归零化处理,进而得到位姿测量系统的测量值 M ,最后对系统正解模型进行逆向解算,获得并联机器人的位姿结果 TR 。

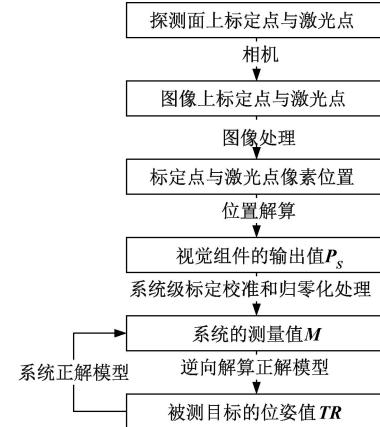


图 2 位姿解算流程框图

Fig. 2 Flowchart of the pose calculation process

2 视觉组件输出值的获取

2.1 视觉组件的探测原理

视觉组件的探测结构如图 3 所示,视觉组件中探测平板的相机侧为组件的探测面,其四角位置的圆形标记的中心为探测面的标定点,4 个标定点的圆心 A, B, C, D 作为顶点组成边长为 L 的虚拟正方形,并以其中心为原点点建立探测面坐标系 $O_s-X_sY_s$ 。激光器安装在并联机器人动平台上随之运动,其在透射幕布上显示移动的激光点,相机实时对探测面进行拍摄,经过图像处理和坐标解算得到激光点的中心 P 在探测面坐标系 $O_s-X_sY_s$ 上的二维坐标,此坐标值即为该视觉组件的输出值。

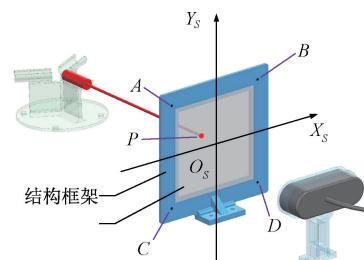


图 3 视觉组件探测结构

Fig. 3 Detection structure of the vision module

2.2 图像的采集与处理方法

图像采集与处理的任务是获得相机所拍摄图像上 4 个标定点与激光点的质心像素。每个视觉组件中的相机需要根据实际成像效果设置焦距、曝光、亮度、对比度等参数,从而获得

清晰、稳定的图像来保证图像处理环节的稳定性^[13-14]。

图像处理流程如图4所示,首先,对所采集的图像以包含全部标点为标准进行裁切,得到用于识别的区域图像;接着,围绕标定点与激光点的颜色特性进行颜色通道提取和增强处理;然后,进行二值化处理显现标定点与激光点并通过形态学处理去除噪声;最后,分别围绕标定点和透射幕布以水平矩形框形式分割,用式(1)方法计算分割区域的斑点中心像素(X_c, Y_c),最终得到图像上激光点和4个标定点的圆斑中心像素位置。

$$X_c = \sum_{i=1}^n x_i / n, Y_c = \sum_{i=1}^n y_i / n \quad (1)$$

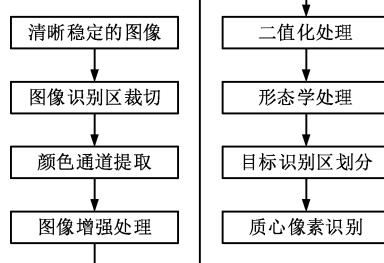


图4 图像处理流程

Fig. 4 Image processing flow

2.3 激光点坐标解算方法

视觉组件中的相机理论上应如图3所示镜组光轴垂直于探测平板安装,经过图形处理得到的标定点与激光点中心像素如图5(a)所示分布,通过标定点位置将像素坐标系 $O_{PS}-X_{PS}Y_{PS}$ 直接映射至如图5(b)所示探测面坐标系 $O_s-X_sY_s$ 得到激光点坐标。然而,视觉组件存在图5(c)所示结构误差,实际图形处理结果的标定点与激光点位置如图5(d)所示。因此,需研究视觉组件的激光点坐标解算方法,将实际图像的像素坐标系 $O_{PS}'-X_{PS}'Y_{PS}'$ 映射至探测面坐标系 $O_s-X_sY_s$ 。

相机镜头光轴与平板安装小角度倾斜下可以忽略透视畸变,将此误差计入视觉组件的全局测量误差。在图5(d)中,通过 P_{PS}' 点的水平辅助线与 $A_{PS}'C_{PS}'$ 和 $B_{PS}'D_{PS}'$ 相交于 E_{PS}' 点和 F_{PS}' 点,利用线性插值关系得到图5(a)中的 E_{PS} 点和 F_{PS} 点,根据 P_{PS}' 点在 $E_{PS}'F_{PS}'$ 线段中的比例位置,确定图像校正后的激光光斑 P_{PS} 像素位置,最后,通过插值方法变换至探测面坐标系 $O_s-X_sY_s$ 得激光点坐标值即视觉组件的输出值 P_s 。

3 位姿测量系统的位姿解算方法

3.1 位姿值推导测量值的系统正解模型

在并联机器人初始状态下的动平台建立定坐标系 $O-$

$$\mathbf{R}_{RPY} = \begin{bmatrix} \cos(R_y)\cos(R_z) & \cos(R_z)\sin(R_x)\sin(R_y) - \cos(R_x)\sin(R_z) & \sin(R_x)\sin(R_z) + \cos(R_x)\cos(R_z)\sin(R_y) \\ \cos(R_y)\sin(R_z) & \cos(R_x)\cos(R_z) + \sin(R_x)\sin(R_y)\sin(R_z) & \cos(R_x)\sin(R_y)\sin(R_z) - \cos(R_z)\sin(R_x) \\ -\sin(R_y) & \cos(R_y)\sin(R_x) & \cos(R_x)\cos(R_y) \end{bmatrix} \quad (2)$$

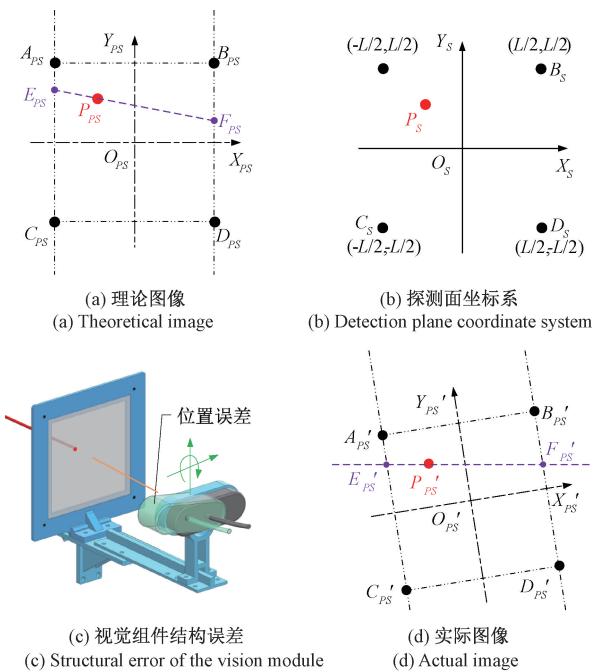


图5 激光点坐标解算方法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of laser point coordinate calculation method

XYZ ,运动到位姿 $TR = [T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z]^T$ 后动平台到达动坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 位置如图6所示,其中姿态分量 $\mathbf{R} = [R_x, R_y, R_z]^T$ 表示动平台的姿态角变化,通常用RPY角进行表述,旋转矩阵为 \mathbf{R}_{RPY} 如式(2)所示;其中位置分量 $\mathbf{T} = [T_x, T_y, T_z]^T$ 表示动平台运动后在定坐标系 $O-XYZ$ 中的位置坐标,因此动平台运动至位姿 TR 的过程可被描述为绕定坐标系 $O-XYZ$ 的 x 轴、 y 轴、 z 轴依次旋转 R_x, R_y, R_z 角度,然后动平台中心平移至定坐标系 $O-XYZ$ 中的 \mathbf{T} 位置。为了实现对并联机器人动平台位姿的六自由度测量,需研究视觉组件上激光点位置与动平台位姿之间的变化关系^[15]。

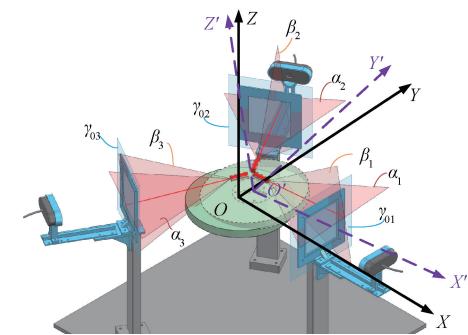


图6 动平台运动位姿模型

Fig. 6 Motion and pose model of the moving platform

结合空间解析几何理论对图 6 所示运动模型进行分析,在第 i 个子测量系统中($i=1,2,3$),激光可用动平台上的面 α_i 与面 β_i 的交线进行描述,视觉组件的探测面可用定坐标系 $O-XYZ$ 中面 γ_{0i} 进行描述。因此,激光点的坐标 $P_i(P_{xi}, P_{yi}, P_{zi})$ 可表示为面 α_i 、面 β_i 与面 γ_{0i} 的交点由式(3)求得,该点在探测面坐标系 $O_{Si}-X_{Si}Y_{Si}$ 上的坐标即为视觉组件的测量值 $\mathbf{P}_{Si} = [P_{sxi}, P_{syi}]^T$;在动平台零位状态时,激光点的空间坐标为 $P_{0i}(P_{0xi}, P_{0yi}, P_{0zi})$ 可由式(4)求得,该点对应在探测面坐标系 $O_{Si}-X_{Si}Y_{Si}$ 上的坐标为 $\mathbf{P}_{S0i} = [P_{s0xi}, P_{s0yi}]^T$ 。综上,并联机器人在位姿 \mathbf{TR} 下的视觉组件测量值可表示为 $\mathbf{M} = \mathbf{P}_{Si} - \mathbf{P}_{S0i}$,即系统的正解模型。

$$\begin{cases} A_{\alpha i}x + B_{\alpha i}y + C_{\alpha i}z + D_{\alpha i} = 0 \\ A_{\beta i}x + B_{\beta i}y + C_{\beta i}z + D_{\beta i} = 0 \\ A_{\gamma 0i}x + B_{\gamma 0i}y + C_{\gamma 0i}z + D_{\gamma 0i} = 0 \\ A_{\alpha 0i}x + B_{\alpha 0i}y + C_{\alpha 0i}z + D_{\alpha 0i} = 0 \\ A_{\beta 0i}x + B_{\beta 0i}y + C_{\beta 0i}z + D_{\beta 0i} = 0 \\ A_{\gamma 0i}x + B_{\gamma 0i}y + C_{\gamma 0i}z + D_{\gamma 0i} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} A_{\alpha i}x + B_{\alpha i}y + C_{\alpha i}z + D_{\alpha i} = 0 \\ A_{\beta i}x + B_{\beta i}y + C_{\beta i}z + D_{\beta i} = 0 \\ A_{\gamma 0i}x + B_{\gamma 0i}y + C_{\gamma 0i}z + D_{\gamma 0i} = 0 \\ A_{\alpha 0i}x + B_{\alpha 0i}y + C_{\alpha 0i}z + D_{\alpha 0i} = 0 \\ A_{\beta 0i}x + B_{\beta 0i}y + C_{\beta 0i}z + D_{\beta 0i} = 0 \\ A_{\gamma 0i}x + B_{\gamma 0i}y + C_{\gamma 0i}z + D_{\gamma 0i} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

系统正解模型的研究基础是空间中平面的位姿变换原理。设空间中一平面为:

$$A_0x + B_0y + C_0z + D_0 = 0 \quad (5)$$

该平面的法向量可表示为 $[A_0, B_0, C_0]^T$,应用式(2)旋转矩阵,经过旋转 \mathbf{R} 后法向量变换为:

$$[A \ B \ C]^T = [A_0 \ B_0 \ C_0]^T \times \mathbf{R}_{RPY} \quad (6)$$

该平面经过平移 \mathbf{T} 后,变换为:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (7)$$

其中, $D = D_0 - AT_x - BT_y - CT_z$

以上单个平面的位姿变换过程可用于描述动平台运动的空间平面系统由式(4)变换至式(3)的过程,即激光点由定坐标系 $O-XYZ$ 中的空间位置 P_{0i} 运动至 P_i 的过程。

建立激光点在空间中三维运动与在探测面坐标系 $O_{Si}-X_{Si}Y_{Si}$ 上二维运动的联系,激光点在定坐标系 $O-XYZ$ 中由点 P_{0i} 运动至点 P_i 可表示为向量 \mathbf{p}_i :

$$\mathbf{p}_i = [P_{xi} - P_{x0i}, P_{yi} - P_{y0i}, P_{zi} - P_{z0i}]^T \quad (8)$$

探测面坐标系 $O_{Si}-X_{Si}Y_{Si}$ 的横坐标轴在空间上可表示为向量 \mathbf{X}_{Si} ,因此的测量值 \mathbf{M} 的横坐标分量 \mathbf{M}_{xi} 可表示为向量 \mathbf{p}_i 在向量 \mathbf{X}_{Si} 上的投影:

$$\mathbf{M}_{xi} = \frac{\mathbf{p}_i \cdot \mathbf{X}_{Si}}{\mathbf{X}_{Si}} \quad (9)$$

探测面坐标系 $O_{Si}-X_{Si}Y_{Si}$ 的纵坐标轴 \mathbf{Y}_{Si} 在定坐标系 $O-XYZ$ 中与探测面横坐标轴 \mathbf{X}_{Si} 及探测面法向量 $[A_{\gamma 0i}, B_{\gamma 0i}, C_{\gamma 0i}]^T$ 分别垂直,因此 \mathbf{Y}_{Si} 为:

$$\mathbf{Y}_{Si} = [A_{\gamma 0i} \ B_{\gamma 0i} \ C_{\gamma 0i}]^T \times \mathbf{X}_{Si} \quad (10)$$

同理,系统测量值 \mathbf{M} 的纵坐标分量 \mathbf{M}_{yi} 可表示为向量 \mathbf{p}_i 在向量 \mathbf{Y}_{Si} 上的投影:

$$\mathbf{M}_{yi} = \frac{\mathbf{p}_i \cdot \mathbf{Y}_{Si}}{\mathbf{Y}_{Si}} \quad (11)$$

综上,由机器人理论和解析几何关系建立了由位姿值

推导测量值的系统正解模型,简记为:

$$\mathbf{M} = forward(\mathbf{TR}) \quad (12)$$

3.2 系统正解模型的逆向解算方法

位姿测量系统由 3 组子测量系统组成,由正解模型解析式可知刚体位姿 \mathbf{TR} 各分量对测量值 \mathbf{M} 的影响是非线性的;在已知正解解析式的因变量 \mathbf{M} 的情况下,求解自变量 \mathbf{TR} 的过程即求解非线性方程组,可采用牛顿迭代法进行解算,方法如下:

系统正解模型式(12)对位姿 \mathbf{TR} 求偏导数的雅可比矩阵为:

$$\mathbf{J}(\mathbf{TR}) = \frac{\partial forward(\mathbf{TR})}{\partial \mathbf{TR}} \quad (13)$$

进一步,迭代公式可表示为:

$$\mathbf{TR}^{(k+1)} = \mathbf{TR}^{(k)} - \mathbf{J}(\mathbf{TR}^{(k)})^{-1} (forward(\mathbf{TR}^{(k)}) - \mathbf{M}) \quad (14)$$

关于迭代初值 $\mathbf{TR}^{(0)}$ 的选取,由于系统的正解模型表现出较强的非线性,无法简单简化成线性方程组,工程实践通常设置零位作为测量参考点,取:

$$\mathbf{TR}^{(0)} = \mathbf{0} \quad (15)$$

工程实际中,已知传感器的分辨率精度 RV ,迭代过程中,当式(14)残差值 RE 代表迭代过程中的测量值与各视觉组件实际测量值之间的差值,当其中的最大值分量 RE_{max} 小于 RV 时,说明已经达到所能测量的最高精度,位姿逆解结果取 $\mathbf{TR}^{(k)}$,可描述为:

$$\begin{cases} RE_{max} = |forward(\mathbf{TR}^{(k)}) - \mathbf{M}|_{max} < RV \\ \mathbf{TR}_{out} = \mathbf{TR}^{(k)} \end{cases} \quad (16)$$

另外,在迭代终止条件(16)未达成的前提下,根据工程实际要求,可按照解的修正量范数 CV 小于设定阈值 TV 为迭代终止条件,代表本次循环的结果与理论结果之间的综合距离,位姿逆解结果取 $\mathbf{TR}^{(k)}$,可描述为:

$$\begin{cases} CV = \|\mathbf{TR}^{(k+1)} - \mathbf{TR}^{(k)}\| < VT \\ \mathbf{TR}_{out} = \mathbf{TR}^{(k+1)} \end{cases} \quad (17)$$

综上,完成了对系统正解模型解析式(12)的逆向解算,得到了位姿测量系统的位姿数值解,该过程可简记为:

$$\mathbf{TR} = inverse(\mathbf{M}) \quad (18)$$

4 实验验证

4.1 位姿测量系统的结构参数

位姿测量系统实验装置如图 7 所示,采用德国 PI 公司的 M-850 型并联机器人作为被测对象,性能参数如表 1 所示,利用其提供高精度位姿检验位姿测量系统的测量精度。

结合图 6 所示系统结构模型,按式(4)所描述的初始状态下系统空间平面模型的参数如表 2 所示。

4.2 视觉组件实验与性能分析

位姿测量系统实验装置中的视觉组件如图 8(a)所示,探测平板上各边标定点间的距离为 120 mm,相机所拍摄

图像如图 8(b)所示,分辨率为 3 840 pixel×2 160 pixel,经裁剪所得识别区域图像如图 8(c)所示,分辨率为 1 900 pixel×1 940 pixel,图像上两标定点间最短距离为 1 673 pixel,经过坐标解算得到探测面坐标系 $O_{Si}-X_{Si}Y_{Si}$ 上的位置如图 8(d)所示。

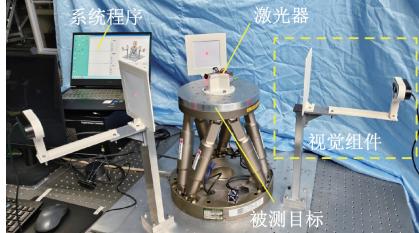


图 7 系统实验装置

Fig. 7 System experimental setup

表 1 被测并联机器人的性能参数

Table 1 Performance parameters of the measured parallel robot

参数	T_x, T_y	T_z	R_x, R_y	R_z
行程范围	±50 mm	±25 mm	±15°	±30°
分辨率	1 μ m	0.5 μ m	5 μ rad	5 μ rad
定位精度	±2 μ m	±1 μ m	±10 μ rad	±10 μ rad

表 2 系统空间平面模型参数

Table 2 System space plane model parameters

空间平面	平面参数			
	A	B	C	D
α_{01} 面	0	-1	0	0
I β_{01} 面	0	0	1	-95
γ_{01} 面	1	0	0	-262
α_{02} 面	-1.732	-1	0	0
II β_{02} 面	0	0	1	-95
γ_{02} 面	0.577	-1	0	302.532
α_{03} 面	-1.732	1	0	0
III β_{03} 面	0	0	1	-95
γ_{03} 面	0.577	1	0	302.532

为全面分析位姿测量系统的位姿测量精度,需展开对视觉组件的测量性能分析实验。首先是位置测量精度实验,固定激光器后连续获取视觉组件输出值,得到位置数组如图 9 所示,通过贝塞尔公式评估视觉组件在 x 轴和 y 轴上的单次测量标准不确定度,得到标准差估计值分别为 0.012 mm 和 0.013 mm。

为了提高全局测量精度,采用三角剖分结合三次插值方法对视觉组件进行全局校准。通过对激光器安装在高精度位移平台上进行遍历标定,得到视觉组件输出值与标定值如图 10(a)所示;应用序号 1~15 的点进行校正误差

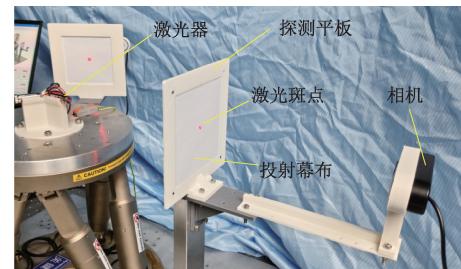
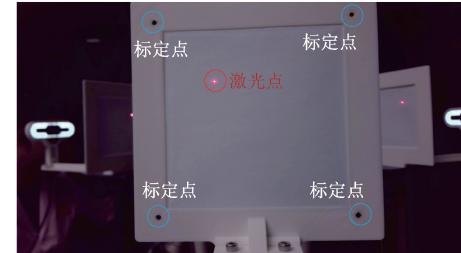
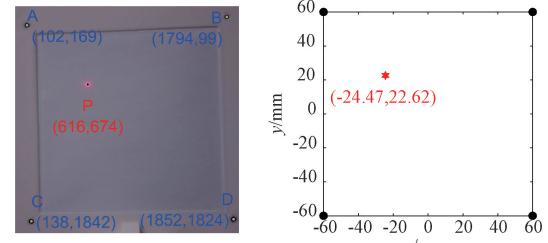
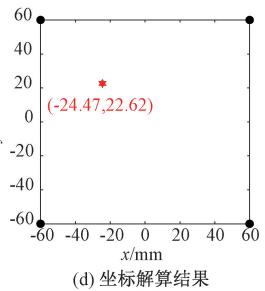
(a) 视觉组件实验结构
(a) Experimental setup of the vision module(b) 相机所采集图像
(b) Image captured by the camera(c) 像素识别结果
(c) Pixel recognition results(d) 坐标解算结果
(d) Coordinate calculation results

图 8 斑点识别结果

Fig. 8 Spot recognition results

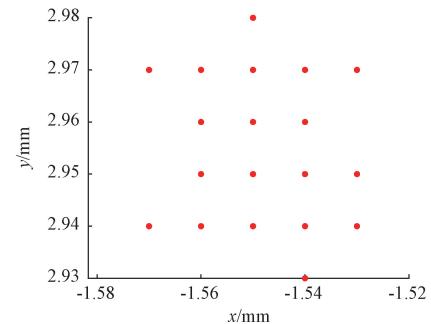


图 9 位置精度实验

Fig. 9 Position accuracy experiment

检验,每次校准排除此点,检验结果如图 10(b)所示,在检验区域线性度误差小于 0.1%。

结合以上分析,对视觉组件的分辨率进行测试,激光器安装在高精度位移平台以 0.1 mm 的步进量沿 x 轴步进传感器,得到视觉组件在 x 轴方向位移增量如图 11 所示,验证了分辨率可达到 0.1 mm。

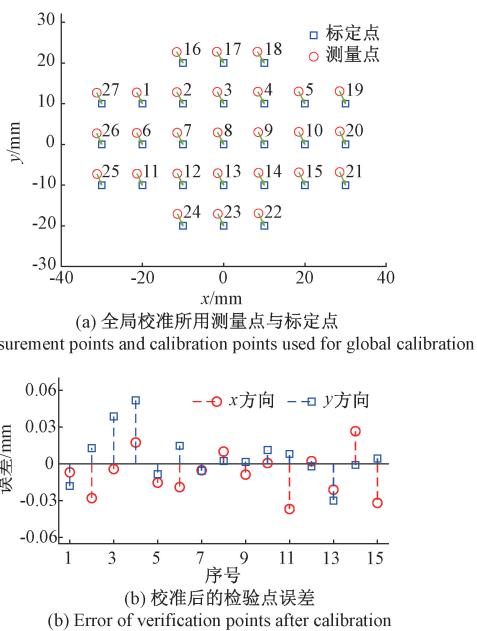


图 10 全局校准实验

Fig. 10 Global calibration experiment

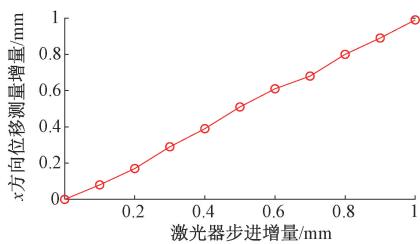


图 11 分辨率实验

Fig. 11 Resolution experiment

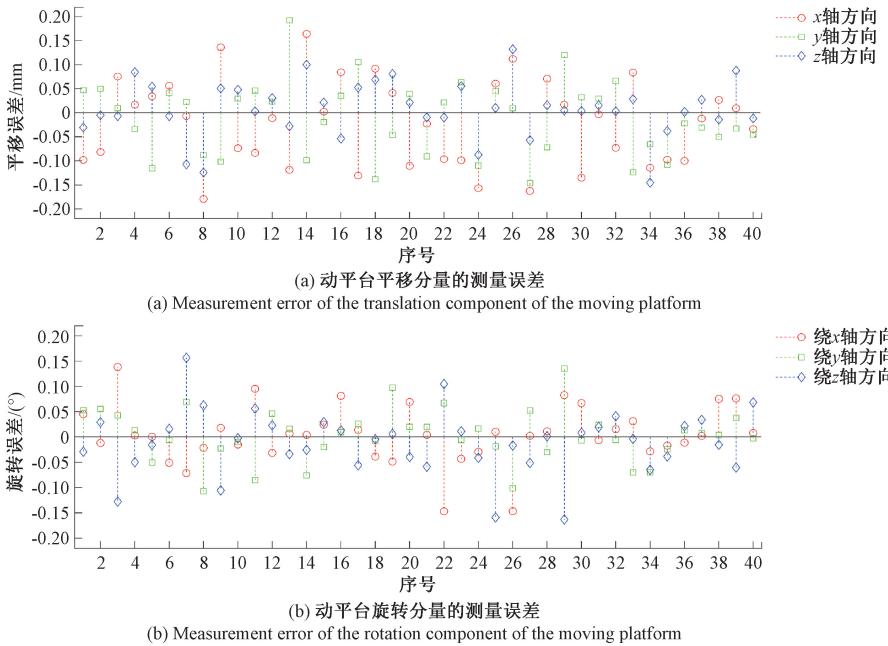


图 12 位姿测量误差

Fig. 12 Pose measurement error

4.3 位姿测量系统实验结果

由视觉组件的结构参数和实验分析可知其激光点的二维测量范围为 ± 50 mm, 结合位姿测量系统实验装置的结构参数和并联机器人运动行程参数, 可得位姿测量系统的量程如表 3 所示。

表 3 位姿测量系统量程

Table 3 Range of the pose measurement system

单自由度运动	量程
平移 T_x	± 43 mm
平移 T_y	± 25 mm
平移 T_z	± 50 mm
旋转 R_x, R_y, R_z	$\pm 10.5^\circ$

在本研究中, 针对位姿测量系统的有效测量范围, 在设定并联平台工作空间中生成了 40 组随机位姿作为理论位姿值 TR_t , 记录位姿测量系统的实际测量值 TR_a , 动平台平移分量和旋转分量的测量误差分布如图 12(a)和(b)所示。

对位姿测量系统测量误差进行分析, 采用欧几里得范数对每组数据的测量误差进行综合描述, 避免误差放大效应, 基于欧几里得范数计算平移和旋转的相对误差分布如图 13(a)和(b)所示, 得到平均相对误差分别为 0.76% 和 2.56%, 均方根相对误差分别为 0.83% 和 2.75%。

为验证位姿测量系统对各自由度的测量性能表现, 对位姿测量系统在每个自由度上的测量误差进行分析, 分别计算每个自由度最大误差、平均误差和均方根误差 (RMSE) 如表 4 所示。

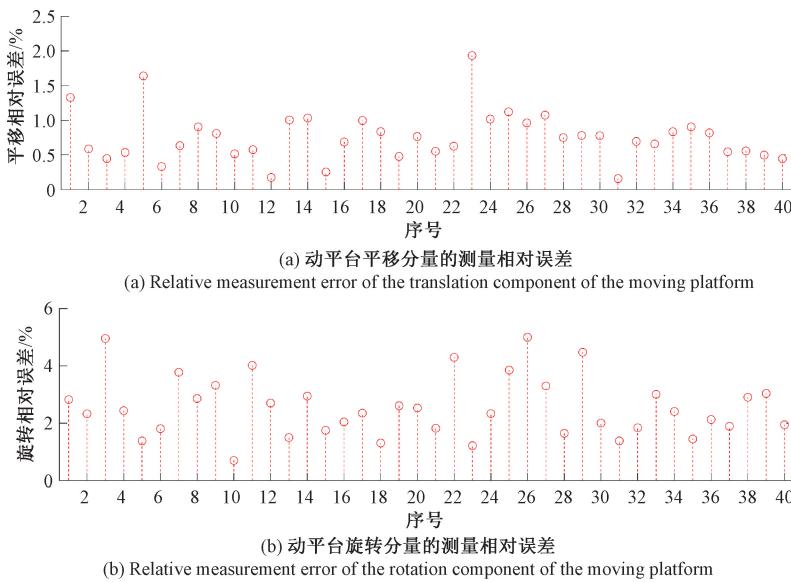


图 13 位姿测量相对误差

Fig. 13 Pose measurement error

表 4 各自由度的测量误差

Table 4 Measurement errors of each degree of freedom

误差	T_x / mm	T_y / mm	T_z / mm	R_x / (°)	R_y / (°)	R_z / (°)
平均误差	0.077	0.064	0.044	0.040	0.039	0.047
最大误差	0.179	0.192	0.145	0.147	0.135	0.163
RMSE	0.092	0.077	0.059	0.057	0.051	0.063

位姿解算方法是测量值与位姿值的准确映射关系,因此位姿测量系统的实验结果误差主要来源于测量值获取阶段。视觉组件输出值 \mathbf{P}_s 的误差受多种因素影响,包括组件结构的加工和安装误差导致的图像透视畸变,相机性能不足导致图像识别解算精度下降,以及电子噪声对激光斑点稳定性和图像质量的影响;系统框架的结构误差会使视觉组件偏离理想位置,从而导致测量值 \mathbf{M} 产生偏移;此外,实验环境中的振动、温度、湿度和光照变化也是重要的误差来源,振动可能通过激光传递路径放大导致测量点抖动,温度和湿度变化可能引起系统结构微小变形导致测量点漂移,光照变化则会影响图像质量降低图像处理算法的效率和稳定性。

综上所述,测量误差是系统内部和外部多个因素共同作用的结果,未来研究应着重于优化系统结构、提升图像识别精度和加强环境控制,以降低系统误差并提高测量系统的整体性能。

5 结 论

本文提出了一种针对并联机器人的非接触式大行程六自由度位姿测量系统。首先采用激光点二维位置解算

方法设计了基于图像处理的视觉组件,具有测量范围广、成本低、鲁棒性强的特点,解决了传统 PSD 测量方法量程不足、成本高和温度漂移的问题,提升了测量系统的整体性能。之后基于解析几何方法建立了系统正解模型,提升了在大位姿测量范围内的理论精度,与传统模型相比,本文的位姿解算方法避免了小距离省略、小角度近似、运动耦合项忽略及高阶项消去等简化造成的误差,适用于并联平台大行程运动的高精度测量,提升了系统的测量准确性。最后通过实验检测了视觉组件自身测量性能,实验计算了位姿测量系统整体测量误差,分析讨论了测量误差来源,从而,验证了位姿测量系统在大量程位姿测量中的可行性。

未来将进一步研究视觉组件结构、系统整体构型、系统正解模型、逆向解算方法与测量精度之间的联系机理,探索误差控制的新方法,以实现更广泛的工程应用和更高精度的位姿测量。

参考文献

- [1] 刘伟,刘顺,邓朝晖,等.工业机器人定位误差补偿技术研究进展[J].机械工程学报,2023,59(17):1-16.
LIU W, LIU SH, DENG ZH H, et al. Research progress on positioning error compensation technology of industrial robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(17): 1-16.
- [2] 符磊.六自由度并联机器人运动学标定的测量构型优化与误差补偿研究[D].贵阳:贵州大学,2024.
FU L. Research on measurement configuration optimization and error compensation for kinematic calibration of six-degree-of-freedom parallel robots[D]. Guiyang: Guizhou University, 2024.
- [3] 温秀兰,康传帅,宋爱国,等.基于全位姿测量优化的机

- 器人精度研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(7): 81-89.
- WEN X L, KANG CH SH, SONG AI G, et al. Study on robot accuracy based on full pose measurement and optimization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(7): 81-89.
- [4] MENG X X, SUN S W, YAN X T, et al. Six-degree-of-freedom posture measurement technologies using position sensitive detectors (PSDs): State of the art[J]. Micromachines, 2022, 13(11): 1903.
- [5] 刘瑾, 张鹏程, 程绍伟, 等. 基于双 PSD 视觉的空间光点位置测量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 81-88.
- LIU J, ZHANG P CH, CHENG SH W, et al. Research on spatial spot position measurement based on dual PSD vision [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (1), 81-88.
- [6] 朱晓强, 陈琦. 基于三维激光扫描点云配准的目标位姿测量[J]. 电子测量技术, 2022, 45(4): 13-18.
- ZHU X Q, CHEN Q. Target pose measurement based on matching of 3D laser scanning point cloud[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(4): 13-18.
- [7] 吴文涛, 何赟泽, 杜旭. 融合相机与激光雷达的目标检测与尺寸测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(6): 169-177.
- WU W T, HE Y Z, DU X, et al. Fusing camera and Lidar for object detection and dimensional measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 37(6): 169-177.
- [8] HOSPODAR E J. A laser metrology system for precision pointing[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2003.
- [9] 李宗峰. 空间微重力环境下主动隔振系统的三维位置测量[J]. 宇航学报, 2010, 31(6): 1625-1630.
- LI Z F. Three-dimensional position measurement of active vibration isolation system in space microgravity environment[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31 (6): 1625-1630.
- [10] 高玉娥, 刘伟, 吕世猛, 等. 基于位置敏感探测器的六自由度精密位姿测量系统[J]. 光学精密工程, 2018, 26(12): 2930-2939.
- GAO Y E, LIU W, LYU SH M, et al. Six-degree-of-freedom displacement and angle measurement system based on two-dimensional position-sensitive detector[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(12): 2930-2939.
- [11] CHEN C J, LIN P D, JYWE W Y. An optoelectronic measurement system for measuring 6-degree-of-freedom motion error of rotary parts [J]. Optics Express, 2007, 15(22): 14601-14617.
- [12] TSAI CH Y. Error-free measurement method for 6-DOF systems via matrix decomposition approach[J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 104: 188-204.
- [13] 周扬, 王龙, 来永斌. 基于最优投影圆锥底面的罐口位姿测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(1): 50-58.
- ZHOU Y, WANG L, LAI Y B. Measurement method of the tanker mouth pose based on optimal projection cone bottom surface [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(1): 50-58.
- [14] 李鹏. 基于改进 PSO-BP 算法的机器人目标位姿识别方法[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(1): 7-12.
- LI P. Robot target pose recognition method based on improved PSO-BP algorithm[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(1): 7-12.
- [15] 韩春杨. 空间大型光学载荷用并联调整机构精度设计与运动学标定研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- HAN CH Y. Accuracy design and kinematic calibration of parallel adjustment mechanism in large space telescope [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.

作者简介

王艺, 硕士研究生, 主要研究方向为位姿测量系统设计。

E-mail: wangyia123bc@163.com

秦超(通信作者), 副研究员, 博士, 主要研究方向为振动控制、空间遥感器力学分析。

E-mail: qinchao@ciomp.ac.cn

徐振邦, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为智能机器人、空间遥感器设计、振动控制。

E-mail: xuzhenbang@ciomp.ac.cn