

六自由度电伺服摆碾成形装备末端位姿单目视觉的测量方法

刘 勇, 郑方焱, 韩星会

(武汉理工大学 汽车工程学院 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: 六自由度电伺服摆碾成形装备末端位姿快速测量是实现装备精确加工的关键。基于单目视觉相机的位姿测量方法快速、有效。首先, 利用单目相机采集固定于装备末端上非共面合作目标的初始图像, 然后经过图像处理和目标特征提取之后可以得到合作目标的二维图像坐标, 实现了将位姿求解问题转换为 PnP (Perspective- n -Point) 问题, 使用正交迭代法对 PnP 问题求解并进行坐标转换, 最终得到六自由度电伺服摆碾成形装备末端位姿。最后, 开展了装备精度测量实验, 结果表明, 装备末端平均位置误差为 0.6413 mm, 平均角度误差为 0.0379°, 验证了所提出方法的有效性。

关键词: 六自由度; 电伺服摆碾成形装备; 位姿测量; 单目视觉; 正交迭代法

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.07.021

中图分类号: TH112 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 07-0202-08

End pose measurement method of six DOF electric servo swing roller forming equipment based on monocular vision

Liu Yong, Zheng Fangyan, Han Xinghui

(Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The rapid measurement of end pose for six degree-of-freedom (DOF) electric servo swing roller forming equipment is the key to achieve the precise machining of equipment, and the pose measurement method based on a monocular vision camera is fast and effective. Therefore, the initial image of non-coplanar cooperative targets fixed to the end of equipment was captured by the monocular camera. Then, through image processing and target feature extraction, the two-dimensional image coordinates of the cooperative targets were obtained, and the transform of the pose solving problem into a PnP (Perspective- n -Point) problem was conducted. Furthermore, PnP problem was solved and transformed into coordinates by the orthogonal iteration algorithm, and the end pose of six DOF electric servo swing roller forming equipment was obtained ultimately. Finally, the precise measurement test of equipment was conducted. The results show that the average position error of the equipment end is 0.6413 mm, and the average angular error is 0.0379°, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: six DOF; electric servo swing roller forming equipment; pose measurement; monocular vision; orthogonal iteration algorithm

六自由度电伺服摆碾成形装备因具有运动速度快、精度高、结构刚度大、承载能力强等优点, 广泛应用于航空航天、汽车等领域^[1-3]。六自由度电伺服摆碾成形装备以并联机构为基础, 近年来学者对于并联机构的运动学、动力学和运动控制等方面的研究越来越深入^[4-6]。六自由度电伺服摆碾成形装备末端执行机构的位姿测量是进行反馈控制的必要一环, 一般测量方法按照传感器的位置可以分为

两大类: 内部测量法和外部测量法。内部测量法需要在被动铰链上安装额外的传感器 (例如在主动件上安装光栅尺等), 这种测量方法属于间接测量位姿, 是通过测量输入量后再通过运动学正解得到, 所以测量精度会受到求解模型的影响。外部测量法是根据独立的外部检测仪器 (例如视觉测量设备、三坐标测量机等) 获得的信息求解位姿, 基于单目视觉测量系统只要求单相机单图像即可解算位姿, 相比于其他测量方法, 其具有结构简单、测量灵活和测量精度高等优点。Bellakehal S 等^[7]提出了应用于并联机器人的基于机器视觉技术的控制方法, 其使用视觉传感器精准测量了末端执行器位姿, 并作为控制反馈。Pulloquina J L 等^[8]利用视觉测量系统对精准并联机器人位姿进行实时检测, 从而控制

收稿日期: 2024-05-29; 修订日期: 2024-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U21A20131)

作者简介: 刘 勇 (1999-), 男, 硕士研究生

E-mail: 914251911@qq.com

通信作者: 郑方焱 (1988-), 男, 博士, 副教授

E-mail: 382280761@qq.com

并联机器人平滑地完成动作。

六自由度电伺服摆碾成形装备末端位姿求解算法是测量方法的核心,算法求解的准确度决定了位姿测量的精确度,为此,研究者提出了多种位姿求解方法。基于特征点的位姿求解方法即 PnP (Perspective- n -Point) 问题应用最为广泛,其中 n 表示特征点的数量,常见的算法包括 P3P 算法、直接线性变换 (Direct Linear Transformation, DLT)、EPnP (Efficient PnP)、UPnP (Uncalibrated PnP) 和非线性优化等。苏贇等^[9]识别和定位地面设置合作目标,从而实现了无人机的跟踪控制。Gui Y 等^[10]在摄像装置上固定了光学滤光片,合作目标为红外发光二极管,通过高斯负拉普拉斯算子检测红外灯的中心,从而得到相机的空间位置和姿态。Lu C P 等^[11]提出正交迭代算法,其全局收敛性表现出色,计算精度高,经过后续学者不断改进优化其算法过程,目前已成为最优秀的迭代位姿估计算法之一^[12]。基于上述研究可知,对于 PnP 问题的求解是关键,提取合作目标的图像特征也是必不可少的。

为此,本研究针对六自由度电伺服摆碾成形装备末端位姿测量问题,提出了一种基于非共面合作目标与正交迭代法相结合的位姿测量方法。首先,介绍了六自由度电伺服摆碾成形装备的工作原理,然后,介绍了基于单目视觉的测量方案,通过合作目标在三维空间坐标系以及二维图像坐

标的对应关系,利用正交迭代法求解装备末端位姿,最后,通过实验验证了本方法的有效性,有较高的实用价值。

1 六自由度电伺服摆碾成形装备的工作原理

六自由度电伺服摆碾成形装备的整体结构如图 1 所示。该装备构型与 Stewart 机构相近,均属于六自由度并联机构。装备包括驱动系统、运动系统、PKM (Parallel Kinematic Machine, 并联运动学机器) 以及凹模系统。驱动系统为 6 组,每组包括伺服电机、减速器、滚珠丝杠、导轨以及驱动滑块,驱动滑块安装在导轨上。运动系统包括一个末端动平台和 6 个并联的连杆支链。伺服电机驱动上滑块进行垂直运动,下球座通过连杆与上滑块连接,6 个下球座固联在末端动平台上。球头连杆通过球铰连接于上滑块内侧,通过球面副连接于下滑块的内表面,使其可以在任意方向进行转动。装备正常运行时,伺服电机有规律地驱动上滑块沿垂直方向上下运动,同时带动对应的连杆有规律的运动,最终 6 个连杆的协调运动带动末端动平台进行运动,最终实现平移、旋转 6 个自由度方向上的空间螺旋运动,末端动平台一端与摆头连接,从而实现薄壁高筋构件的空间包络成形制造。

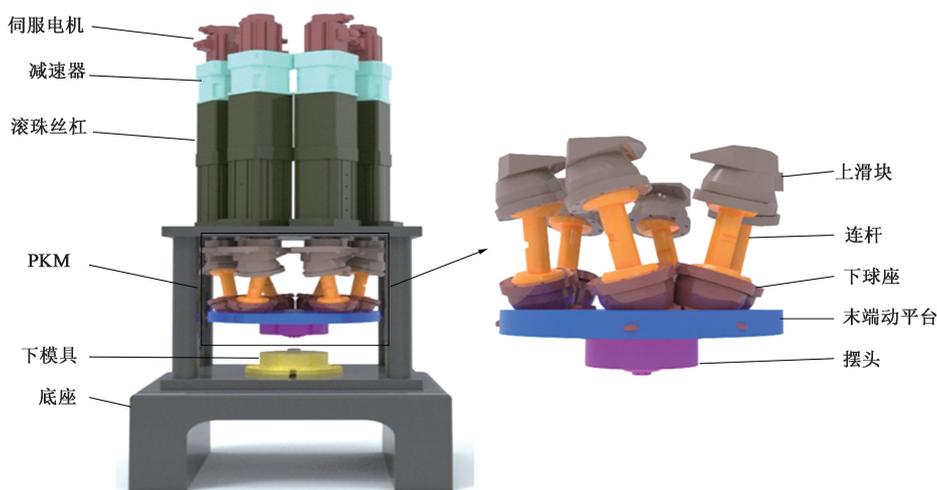


图 1 六自由度电伺服摆碾成形装备结构图

Fig. 1 Structure diagram of six DOF electric servo swing roller forming equipment

2 六自由度电伺服摆碾成形装备末端位姿测量方案

本文采用基于合作目标的单目视觉系统对六自

由度电伺服摆碾成形装备末端进行实时位姿测量,测量系统如图 2 所示,在静平台表面建立坐标系 S_A , 其原点 A_0 位于静平台的几何中心, Z_A 轴向上平行于滑块的滑动方向,在末端动平台表面建立坐

标系 S_B ，其原点 B_0 位于末端动平台外接圆的几何中心， Z_B 轴向上与末端动平台的表面垂直。以相机光学中心为原点建立相机坐标系 S_C ，该坐标系的横轴 X_C 和纵轴 Y_C 分别平行于成像平面的横轴和纵轴，此外 Z_C 轴朝向外并且垂直于成像平面，即相机的光轴。合作目标固定于末端动平台上。当末端动平台运动时，相机实时采集合作目标的图像，通过单目视觉系统得到末端动平台 S_B 相对于相机坐标系 S_C 的位姿关系，相机坐标系 S_C 相对于静平台坐标系 S_A 的位姿关系固定，经过坐标变换可得末端动平台 S_B 相对于静平台坐标系 S_A 的位姿关系，即末端位姿。该系统的测量方案是由外部光源对合作目标进行照明，由工业相机采集到合作目标的反光初始图像，对图像进行预处理以及特征提取后，得到合作目标在图像中的二维坐标，再使用 PnP 求解算法得到位姿信息。

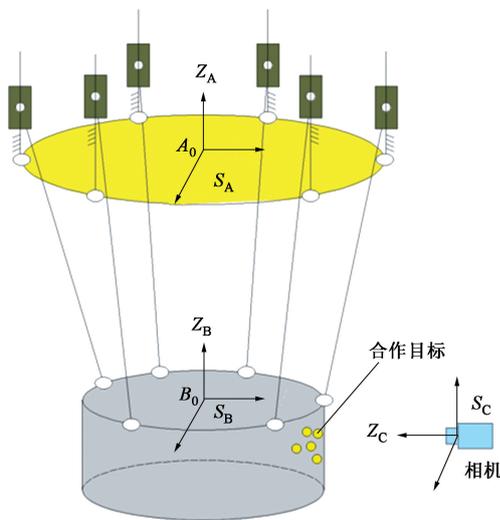


图 2 单目视觉测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of monocular vision measurement system

六自由度电伺服摆碾成形装备末端位姿测量流程如图 3 所示，主要有以下几个步骤。

(1) 相机以及合作目标的标定

首先，采用张氏标定法对相机内部参数进行标定，其次，通过标定获得相机坐标系相对于静平台坐标系固定的相对位姿，最后，对固定在末端动平台上的合作目标进行标定，获得各个合作目标相对于末端动平台的三维坐标。

(2) 图像采集以及图像处理

利用单目相机采集到合作目标跟随末端动平台运动的图像，对初始图像进行滤波去噪、图像增强和边缘检测等操作，最后采用椭圆拟合法提取合作

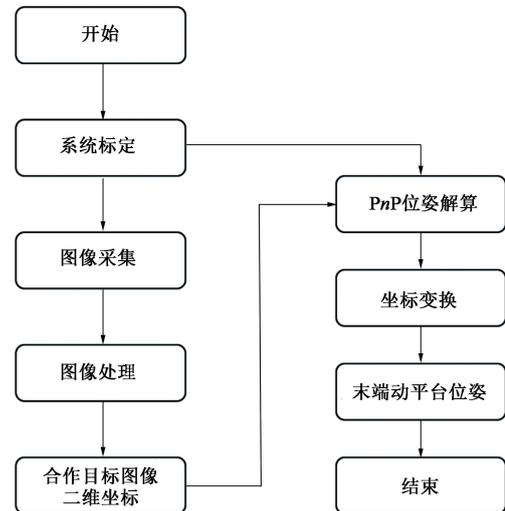


图 3 位姿测量系统流程图

Fig. 3 Flow chart of pose measurement system

目标的中心二维坐标。

(3) 位姿求解

采用正交迭代法求解末端动平台相对于相机的位姿，其原理为：首先给定一个旋转矩阵的初始值，平移向量的值由旋转矩阵确定，由透视投影成像形成最小误差为目标函数，通过奇异值分解法获得最优迭代值。最后通过坐标变换得到末端动平台相对于静平台的位姿。

3 单目视觉位姿测量原理

本文使用针孔透视模型作为相机成像模型，其因高还原性以及简洁性而被广泛的研究及应用。相机的针孔透视投影成像原理就是利用小孔成像，将真实的三维世界坐标投影到二维的相机坐标上，在相机拍摄对象后，图像上像素的位置取决于相机的内部参数、拍摄对象和相机的相对位姿关系。像素的灰度值表示拍摄对象特定点处光强度。要使用相机确定六自由度电伺服摆碾成形装备末端动平台的位姿，首先需要定义图像像素坐标系、图像坐标系、相机坐标系和世界坐标系 4 个坐标系，其转换关系如图 4 所示，同时对相机内部参数建模，最后得到相机的成像模型如图 5 所示。

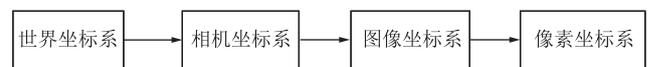


图 4 成像模型坐标系转换示意图

Fig. 4 Schematic diagram of image model coordinate system transformation

假设某一点 p_i 在世界坐标系下坐标为 P_{wi} ，其到相机坐标系中的坐标 P_{Ci} 的刚体变换关系为：

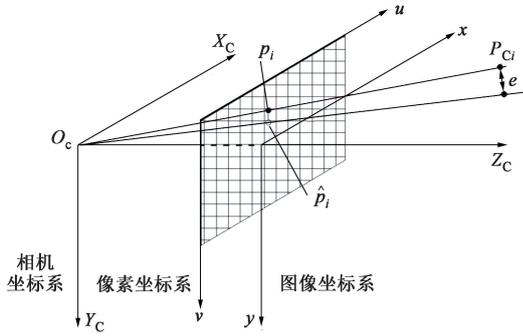


图 5 空间共线误差示意图

Fig. 5 Schematic diagram of spatial collinearity error

$$\begin{bmatrix} P_{Ci} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{wi} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： R 为旋转变换矩阵； t 为平移变换向量。

将点 p_i 三维坐标代入得：

$$\begin{bmatrix} X_{Ci} \\ Y_{Ci} \\ Z_{Ci} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由相机坐标系到图像坐标系的透视投影变换关系为：

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_{Ci}} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{Ci} \\ Y_{Ci} \\ Z_{Ci} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： x_i 、 y_i 为点 p_i 在图像坐标系中的横纵坐标值； f 为相机焦距。

由图像坐标系转换到像素坐标系的仿射变换为：

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： u_i 、 v_i 为点 p_i 在像素坐标系中的横纵坐标值； dx 、 dy 分别为一个像素点在 x 、 y 轴方向的尺寸大小； u_0 、 v_0 为图像坐标系原点在像素坐标系下的坐标。

所以，由式 (1) ~ 式 (4) 可以得到空间中某一点 p_i 在相机上的成像变换为：

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_{Ci}} \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix} = sK_cGP_{wi} \quad (5)$$

式中： s 为尺度因子； f_x 、 f_y 分别为相机在成像平面 u 、 v 轴上的缩放尺度， $f_x = f/dx$ ， $f_y = f/dy$ ； K_c 为相机的内参矩阵，其只有在相机内部结构变化时才会改变； G 为相机的外参矩阵，代表了相机自身与世界坐标系的相对位姿。

PnP 问题中，所求的旋转矩阵为正交矩阵，利用此特性，Lu C P 等^[11]提出了正交迭代法 (Orthogonal Iterative, OI)。首先给定一个旋转矩阵的初始值，平移向量的值由旋转矩阵确定，由透视投影成像形成最小误差为目标函数，通过奇异值分解法获得最优迭代值。由于采用奇异值分解，保证了旋转矩阵在迭代过程中保持正交性。

假设有 n 个特征点 P_{wi} ，已知它们在世界坐标系中的坐标为 $P_{wi} = (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi})^T$ ，在相机坐标系下的坐标表示为 $P_{Ci} = (X_{Ci}, Y_{Ci}, Z_{Ci})^T$ ，图像坐标系下的坐标表示为 $p_i = (x_i, y_i, 1)^T$ 。如图 5 所示，如果根据理想的投影关系，向量 $O_c P_{Ci}$ 与向量 $O_c p_i$ 是在同一直线上，所以向量 $O_c P_{Ci}$ 在向量 $O_c p_i$ 延长线上的投影应该与 $O_c P_{Ci}$ 相同，但是，由于存在图像二维特征坐标的计算误差与外部噪声等因素的影响，实际提取到的图像坐标系下的坐标 \hat{p}_i 与 p_i 二者会存在一定的误差，被称为重投影误差，投射到相机坐标系中称为目标空间共线误差 e_i ，数学表述如下：

$$e_i = P_{Ci} - V_i P_{Ci} = (I - V_i) P_{Ci} = (I - V_i) (R P_{wi} + t) \quad (6)$$

式中： V_i 为视线投影矩阵， $V_i = \frac{\hat{p}_i \hat{p}_i^T}{\hat{p}_i^T \hat{p}_i}$ ； I 为单位矩阵； R 、 t 为待求量。

于是位姿迭代估计问题的解决可以变换为求解最小目标空间共线误差问题，即：

$$\min_{R, t} (R, t) = \sum_{i=1}^n \| (I - V_i) (R P_{wi} + t) \|^2 \quad (7)$$

对于给定的旋转变换矩阵 R ，假设式 (7) 的最优值为 0，可得最优平移变换向量 t 的闭式解可由旋转变换矩阵表示，即：

$$t(R) = \frac{1}{n} (I - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i)^{-1} \sum_{i=1}^n (V_i - I) R P_{wi} \quad (8)$$

令：

$$\begin{aligned} q_i(R) &= V_i [R P_{wi} + t(R)] \\ \bar{q}(R) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i(R) \end{aligned} \quad (9)$$

则式 (7) 可改写成：

$$\min_{\mathbf{R}} e(\mathbf{R}) = \sum_{i=1}^n \|\mathbf{R}\mathbf{P}_{wi} + \mathbf{t}(\mathbf{R}) - \mathbf{q}_i(\mathbf{R})\| \quad (10)$$

定义协方差矩阵 $\mathbf{M}(\mathbf{R})$:

$$\mathbf{M}(\mathbf{R}) = \sum_{i=1}^n [\mathbf{q}_i(\mathbf{R}) - \bar{\mathbf{q}}(\mathbf{R})][\mathbf{P}_{wi} - \bar{\mathbf{P}}_w]^T \quad (11)$$

式中: $\bar{\mathbf{P}}_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_{wi}$ 。

根据式 (10) 进行绝对定向问题的奇异值分解, 将矩阵 \mathbf{M} 进行奇异值分解可得最优变换 \mathbf{R}^* 。记 \mathbf{R} 的第 $k-1$ 次迭代优化值为 \mathbf{R}^{k-1} , 那么 $\mathbf{t}^{k-1} = \mathbf{t}(\mathbf{R}^{k-1})$, $\mathbf{q}_i^{k-1} = \mathbf{V}_i(\mathbf{R}^{k-1}\mathbf{P}_{wi} + \mathbf{t}^{k-1})$, 根据奇异值分解法求解 \mathbf{R}^* 的最优条件, 则第 k 次迭代可表示为:

$$\mathbf{R}^k = \arg \min_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{R}^{k-1}\mathbf{P}_{wi} + \mathbf{t} - \mathbf{q}_i^{k-1}\| = \arg \max_{\mathbf{R}} \text{tr}(\mathbf{R}^T \mathbf{M}(\mathbf{R}^{k-1})) \quad (12)$$

式中: $\text{tr}()$ 为矩阵的迹。

由式 (12) 可得到旋转变换矩阵 \mathbf{R} 的第 k 次迭

代值, 同时 \mathbf{t}^k 可以通过式 (8) 得到。经过迭代得到不同的旋转变换矩阵 \mathbf{R} , 使得误差最小, 即为最优解。正交迭代法具有全局收敛性, 但是, 假如初始旋转矩阵 \mathbf{R}^0 与最终的目标值差异较大时, 就会需要更多的迭代次数, 计算时间也会增加。

4 实验和结果分析

为了验证末端动平台的位姿测量方法的有效性, 搭建了六自由度电伺服摆碾成形装备单目视觉测量位姿实验平台, 实验平台如图 6 所示, 主要由六自由度电伺服摆碾成形装备、海康工业相机、合作目标等组成, 六自由度电伺服摆碾成形装备的硬件参数如表 1 所示, 相机型号为 MV-CA016-UM, 分辨率为 1440 像素 \times 1080 像素, 合作目标由 7 个圆形高反射标志点组成, 固联在末端动平台上。在平移距离上要求测量精度为 1 mm, 旋转角度上要求测量精度为 0.1°。

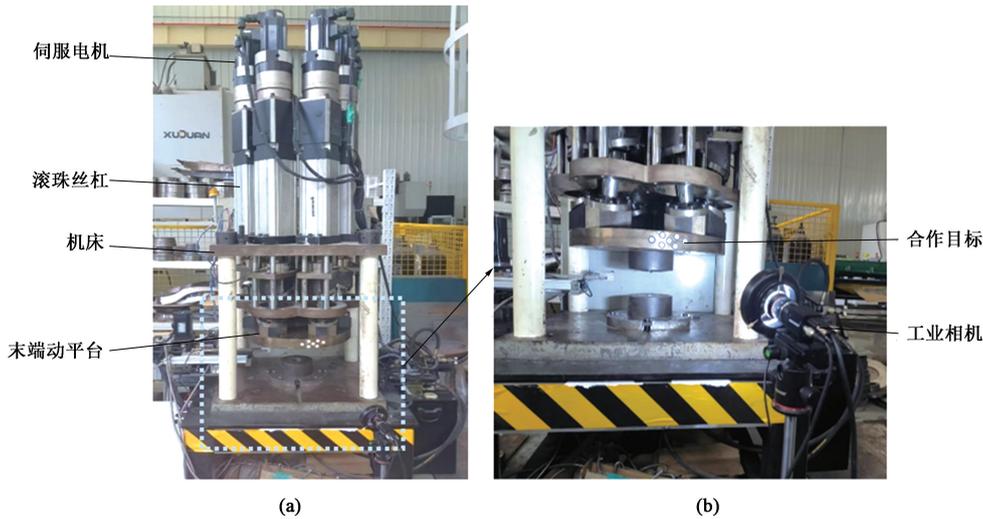


图 6 实验平台

(a) 六自由度电伺服摆碾成形装备 (b) 单目视觉测量系统

Fig. 6 Experimental platform

(a) Six DOF electric servo swing roller forming equipment (b) Monocular vision measurement system

表 1 六自由度电伺服摆碾成形装备硬件参数

Table 1 Hardware parameters of six DOF electric servo swing roller forming equipment

参数	数值
电机额定扭矩/(N·m)	6.37
电机额定转速/(r·min ⁻¹)	3000
丝杠直径/mm	Φ50
丝杠行程/mm	150
摆碾机公称压力/kN	200
摆碾机台面尺寸/mm	300

设置六自由度电伺服摆碾成形装备末端动平台高度 $h = 300$ mm, 摆动速度 $\omega = 2\pi \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, 摆角 $\varphi = 1^\circ$, 末端动平台理想位姿运动为 $x=0, y=0, z=h, \alpha = \varphi \cos(\omega T), \beta = \varphi \sin(\omega T), \gamma = 0$, 如图 7 所示, 其中 x, y, z 为沿 x, y, z 轴的平移量, α, β, γ 为沿 x, y, z 轴的旋转量, T 为时间。工业相机采集合作目标图像, 经过解算之后得到末端动平台的位姿作为测量值, 将其与理想位姿值做比较, 得到测量位姿误差曲线, 如图 8 所示, 对其进行数据分析, 得到位姿误差分析表如表 2 所示。其中, Max

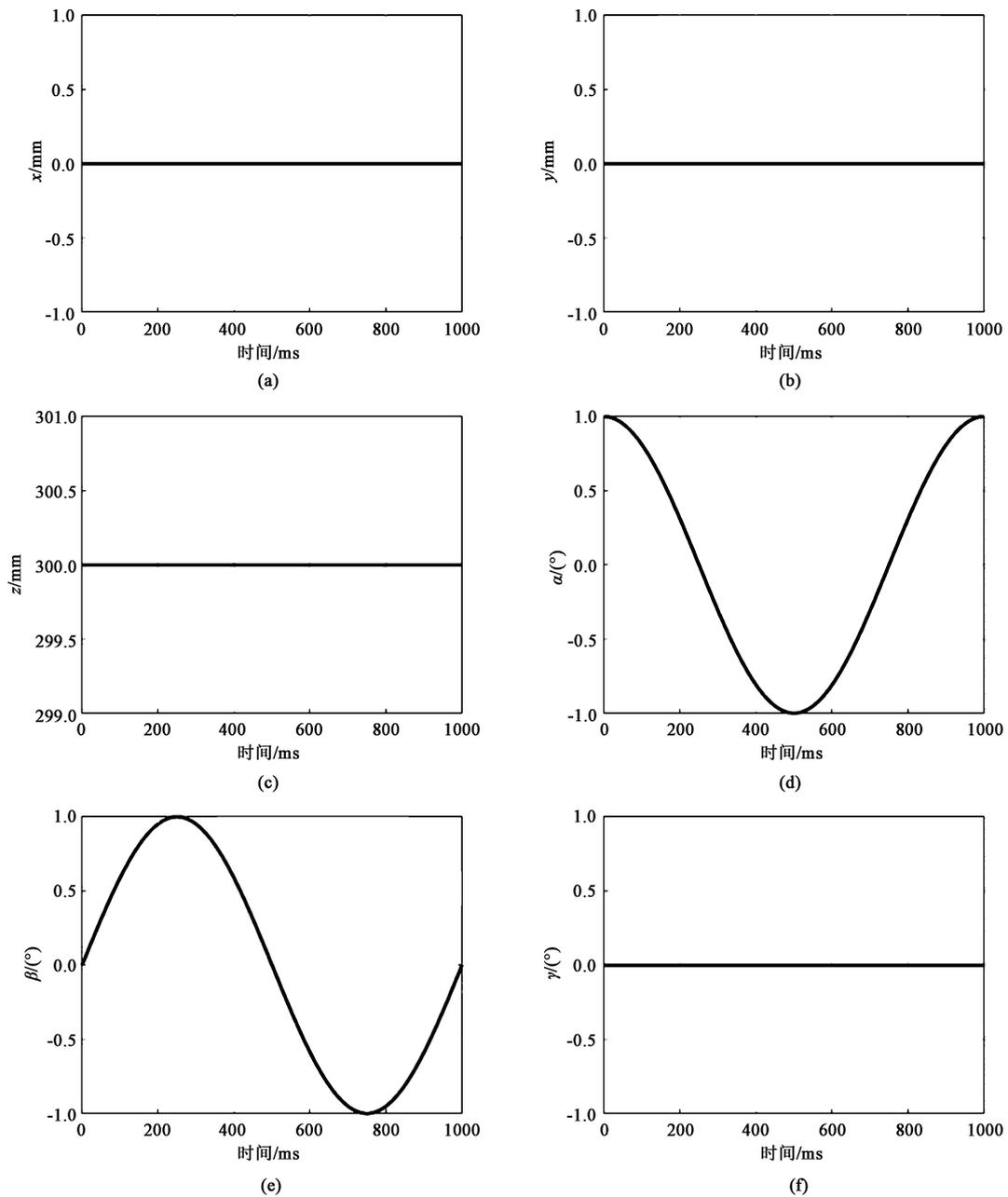


图 7 末端理想运动位姿
(a) x (b) y (c) z (d) α (e) β (f) γ

Fig. 7 Ideal motion poses of end

代表测量误差最大值, $Mean$ 代表测量误差平均值, 均方根误差 $RMSE$ 代表测量值与真实值之间的偏差, 其值越小, 代表测量精度越高。由表 2 可得, 在平移距离上, x 轴方向的 Max 和 $RMSE$ 最大, 分别为 1.7195 和 0.8193 mm, 在 y 轴方向上最小, 分别为 0.9889 和 0.4402 mm。在旋转角度上, β 的 Max 和 $RMSE$ 最大, 达到了 0.1403° 和 0.0699° , α 和 γ 的 Max 、 $Mean$ 和 $RMSE$ 相差不大, α 的 $RMSE$ 最小, 为 0.0210° 。该测量精度基本满足六自由度电伺服

摆碾成形装备的精度要求。在实验过程中, 会存在环境、设备、合作目标的标定以及制作精度、图像处理 and 算法求解等因素引起的测量误差, 如果想要进一步提高测量精度, 需要进一步完善实验设备, 还可以考虑在兼顾算力的情况下, 增加合作目标的数量, 让测量更加精准。

5 结论

(1) 为了对六自由度电伺服摆碾成形装备末端

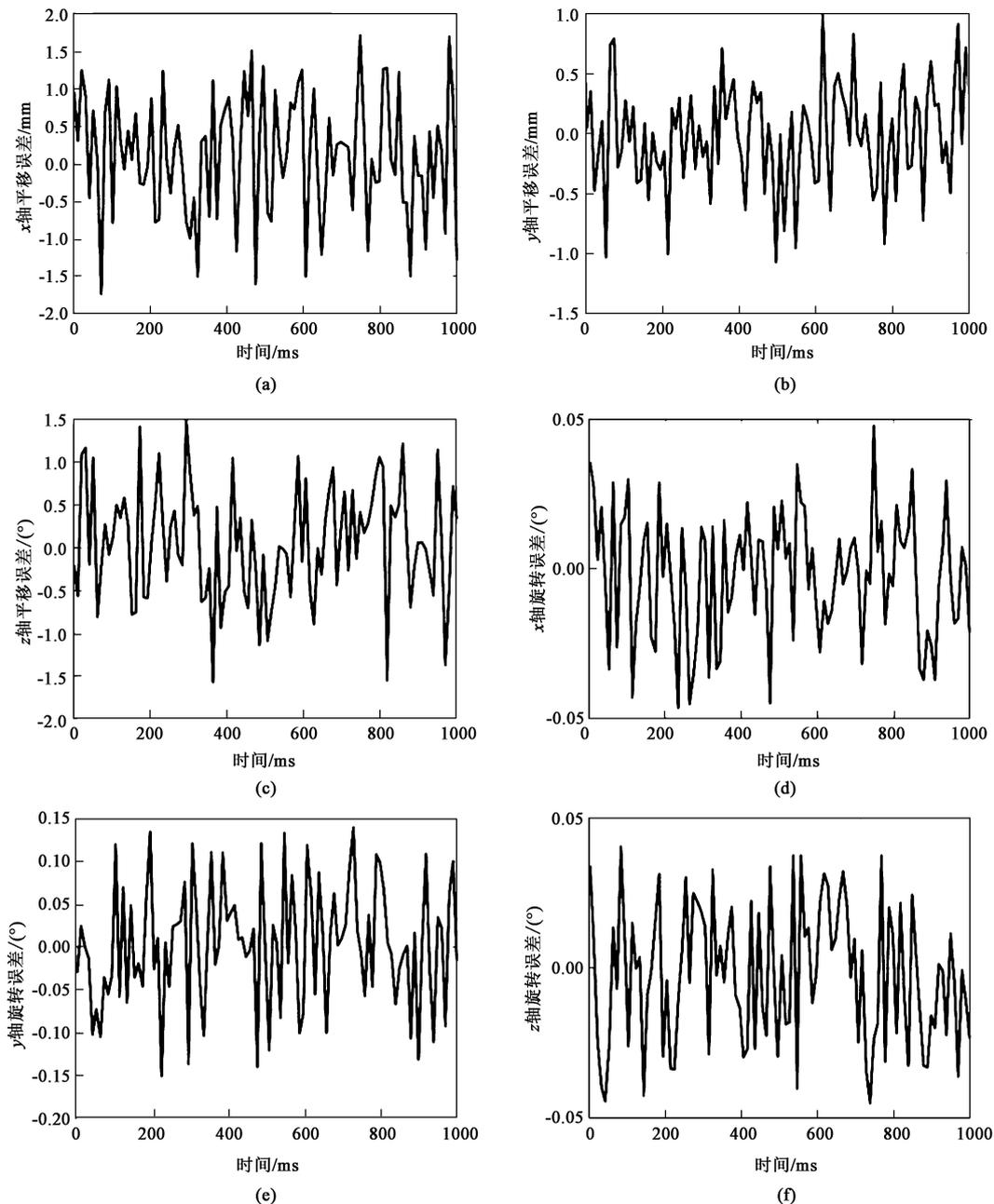


图 8 末端位姿测量误差

(a) x 轴平移误差 (b) y 轴平移误差 (c) z 轴平移误差 (d) x 轴旋转误差 (e) y 轴旋转误差 (f) z 轴旋转误差

Fig. 8 Measured errors of end pose

(a) Position error along x axis (b) Position error along y axis (c) Position error along z axis (d) Angular error along x axis
(e) Angular error along y axis (f) Angular error in along z axis

表 2 基于单目视觉的末端位姿测量误差

Table 2 Measured errors of end pose based on monocular vision

参数	Max	Mean	RMSE
x/mm	1.7195	0.1208	0.8193
y/mm	0.9889	-0.0199	0.4402
z/mm	1.4839	0.0611	0.6646
$\alpha/(\circ)$	0.0479	-0.0019	0.0210
$\beta/(\circ)$	0.1403	0.0031	0.0699
$\gamma/(\circ)$	0.0408	-0.0021	0.0230

动平台位姿进行实时测量，本文提出了一种基于单目视觉的测量系统，其通过实时采集合作目标的运动图像，对图像进行处理以及特征提取得到合作目标的二维坐标，将位姿测量问题转换为 PnP 问题，最终利用正交迭代法求解出末端动平台的实时位姿。

(2) 对所提出的测量方法进行实验，结果表明，在六自由度电伺服摆碾成形装备末端动平台的

平移距离上,其平均最大误差为 1.3974 mm,平均 *RMSE* 为 0.6413 mm。在末端动平台旋转角度上,其平均最大误差为 0.0763°,平均 *RMSE* 为 0.0379°,验证了提出方法的有效性以及可行性,在六自由度电伺服摆碾成形装备的运动测量中有应用及推广价值。

参考文献:

- [1] 雷焯东,詹梅,樊晓光,等.带筋薄壁构件成形制造技术的发展与展望[J].西北工业大学学报,2022,40(1):1-17.
Lei Y D, Zhan M, Fan X G, et al. Development and prospects of forming and manufacturing technology for ribbed thin-walled components [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40 (1): 1-17.
- [2] Russo M, Zhang D, Liu X J, et al. A review of parallel kinematic machine tools: Design, modeling, and applications [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2024, 196: 104118.
- [3] 孙友松,章争荣.伺服成形技术及其若干发展动向[J].锻压技术,2022,47(1):1-16.
Sun Y S, Zhang Z R. Servo forming technology and its development trends [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (1): 1-16.
- [4] 倪仕全,田大鹏.3-PRS 并联机构的动力学惯量耦合特性分析[J].机电工程,2021,38(7):815-821.
Ni S Q, Tian D P. Analysis of dynamic inertia coupling characteristics of 3-PRS parallel mechanism [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38 (7): 815-821.
- [5] 王宗平,赵登峰,曾国英.一种六自由度并联机构的动力学模型[J].机械设计与制造,2018(S1):71-74,77.
Wang Z P, Zhao D F, Zeng G Y. A dynamic model of a six-degrees-of-freedom parallel mechanism [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018 (S1): 71-74, 77.
- [6] 陈明方,黄良恩,魏松坡,等.基于 Jacobian+RBF 的 3-PTT 并联机构末端精确控制方法[J].农业机械学报,2023,54(2):430-440.
Chen M F, Huang L E, Wei S P, et al. Accurate end control method for 3-PTT parallel mechanism based on Jacobian + RBF [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54 (2): 430-440.
- [7] Bellakehal S, Andreff N, Mezouar Y, et al. Vision/force control of parallel robots [J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46 (10): 1376-1395.
- [8] Pulloquina J L, Escarabajal R J, Ferrándiz J, et al. Vision-based hybrid controller to release a 4-DOF parallel robot from a type II singularity [J]. Sensors, 2021, 21 (12): 4080-4080.
- [9] 苏赞,王挺,姚辰,等.基于合作目标的无人机目标跟踪方法[J].机器人,2019,41(4):425-432.
Su Y, Wang T, Yao C, et al. UAV target tracking method based on cooperative target [J]. Robot, 2019, 41 (4): 425-432.
- [10] Gui Y, Guo P, Zhang H, et al. Airborne vision-based navigation method for UAV accuracy landing using infrared lamps [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2013, 72 (2): 197-218.
- [11] Lu C P, Mjolsness E, Hager G D. Fast and globally convergent pose estimation from video images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22 (6): 610-622.
- [12] 熊芝,许航,张刘港,等.基于加权加速正交迭代算法的相机位姿估计[J].红外与激光工程,2022,51(10):183-191.
Xiong Z, Xu H, Zhang L G, et al. Camera pose estimation based on weighted accelerated orthogonal iteration algorithm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51 (10): 183-191.
- [54] Hu Q, Yoon J W. Anisotropic distortional hardening based on deviatoric stress invariants under non-associated flow rule [J]. International Journal of Plasticity, 2022, 151: 103214.
- [55] Fan X G, Jiang X Q, Zeng X, et al. Modeling the anisotropy of hot plastic deformation of two-phase titanium alloys with a colony microstructure [J]. International Journal of Plasticity, 2018, 104 (2): 173-195.
- [56] Li H, Zhang H Q, Yang H, et al. Anisotropic and asymmetrical yielding and its evolution in plastic deformation; Titanium tubular materials [J]. International Journal of Plasticity, 2017, 90: 177-211.
- [57] Suwas S, Lahiri I, Ray R, et al. The Knoop hardness yield locus of Ti-24Al-11Nb alloy [J]. Materials Letters, 2003, 57 (21): 3251-3256.
- [58] Mondal C, Singh A K, Mukhopadhyay A K, et al. Effects of different modes of hot cross-rolling in 7010 aluminum alloy: Part II. Mechanical properties anisotropy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44 (6): 2764-2777.
- [59] Mishra T, De Rooij M, Shisode M, et al. Characterization of yield criteria for zinc coated steel sheets using nano-indentation with Knoop indenter [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 381: 125110.
- [60] Zecevic M, Cawkwell M J, Ramos K J, et al. Simulating Knoop hardness anisotropy of aluminum and β -HMX with a crystal plasticity finite element model [J]. International Journal of Plasticity, 2021, 144: 103045.
- [61] Satošek R, Pepelnjak T, Starman B. Characterisation of out-of-plane shear behaviour of anisotropic sheet materials based on indentation plastometry [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 253: 108403.
- [62] Jeong K, Lee K, Lee S, et al. Deep learning-based indentation plastometry in anisotropic materials [J]. International Journal of Plasticity, 2022, 157 (8): 103403.
- [63] Jeong K, Lee K, Kwon D, et al. Parameter determination of anisotropic yield function using neural network-based indentation plastometry [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023: 108776.

(上接第 201 页)