

# 基于结构光视觉引导的工业机器人定位系统

解则晓<sup>1</sup> 陈文柱<sup>2\*</sup> 迟书凯<sup>3</sup> 牟楠<sup>4</sup>

中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100

**摘要** 为实现工业机器人对目标对象的三维定位,提出了一种线结构光视觉引导的新型工业机器人定位系统。以工业相机、激光器和振镜组成的线结构光自扫描测量装置作为视觉传感器,借助振镜转动实现激光平面对目标对象的扫描,获取目标对象在相机坐标系下的三维位姿。为了将目标对象的三维位姿从相机坐标系转换至机器人工具坐标系,提出了机器人手眼关系与工具坐标系联合标定的方法,最终实现了工业机器人对随机位姿目标对象的三维定位。实验结果表明,系统具有较高的定位精度,其灵活性和稳定性满足工业现场的应用要求。

**关键词** 机器视觉; 视觉定位; 结构光; 自扫描; 工业机器人

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1015001

## Industrial Robot Positioning System Based on the Guidance of the Structured-Light Vision

Xie Zexiao<sup>1</sup> Chen Wenzhu<sup>2</sup> Chi Shukai<sup>3</sup> Mu Nan<sup>4</sup>

Engineering College, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

**Abstract** In order to realize the three-dimensional positioning function of the industrial robot to target objects, a novel structured-light vision guided industrial robot positioning system is proposed. Structured-light auto-scanning measurement module consisting of industrial camera, laser, and galvanometer is used as the vision sensor of the positioning system. By scanning target objects with laser plane through the rotation of the galvanometer, the three-dimensional pose of target objects in camera coordinate is obtained. For the conversion of target objects three-dimensional pose from the camera coordinate system to the robot tool coordinate system, a simultaneous calibration scheme of the robot hand-eye relationship and the tool coordinate system is put forward. The three-dimensional positioning function of the industrial robot to target objects with random position and orientation can be implemented. Experimental results show that the proposed system has high positioning accuracy, and its flexibility and accuracy can meet the requirements of industrial applications.

**Key words** machine vision; vision positioning; structured-light; auto-scanning; industrial robots

**OCIS codes** 150.0155; 100.6890; 120.5800; 130.6010; 140.3460

## 1 引言

对机器人多数应用场景而言,需要预知目标对象的位姿才能完成相应的作业任务。目前在机器人的工业应用中,大多通过手动示教或离线编程的方式来规划机器人的工作路径,然而这种方法严格限定了目标对象的起始位姿和终止位姿,只能机械地重复提前规划好的路径,且不同的工作对象需要分别示教以得到相应的示教文件,高度结构化的工作环境严重制约了机器人的工作效率、灵活性和智能性,无法满足柔性生产系统的要求<sup>[1]</sup>。

机器视觉以其快速、稳定、非接触的特点,在工业生产中得到了广泛的应用。通过视觉引导的方式协助机器人完成对目标对象的定位,这种方法可以有效地提高生产线的工作效率和自动化水平<sup>[2]</sup>。为此,翟敬梅

收稿日期: 2016-04-26; 收到修改稿日期: 2016-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(61571408,51509229)

作者简介: 解则晓(1968—),男,博士,教授,主要从事机器视觉和机器人运动控制及机器人测量等方面的研究。

E-mail: xiezexiao@ouc.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: cwzll@qq.com

等<sup>[3]</sup>将相机固定于工件上方,采用二维视觉引导系统的方式实现工业机器人的定位抓取,但只能应用于无定位水平传送场合,无法实现三维(3D)视觉引导;Ishibashi<sup>[4]</sup>提出了基于双目立体视觉的机器人定位方法,可以实现目标对象的快速、非接触三维定位,但双目视觉对应点难以匹配,仅能应用于具有显著特征的目标对象;Schmidt等<sup>[5]</sup>将单目相机固定于机器人末端,并通过在目标对象表面粘贴标记点的方式实现三维定位,具有较高的定位精度,但需提前在工件表面粘贴标记点,且需要额外的设备引导机器人至目标对象附近,以确保工件位于相机视野内。

为解决上述问题,本文提出一种线结构光视觉引导的机器人定位系统。结构光自扫描装置<sup>[6-7]</sup>和工业机器人组成 Eye to Hand 式手眼视觉系统,通过线结构光自扫描获取目标对象在相机坐标系下的三维位姿<sup>[8]</sup>,再根据机器人手眼关系,实现机器人对目标对象的定位。提出了一种机器人手眼关系和工具坐标系联合标定的方法,与两者独立标定相比,不存在误差传递问题,对提高机器人定位精度有重要意义。系统参数标定简便易行,利用平面棋盘靶标即可完成系统各模块参数的标定,能够满足工业现场标定要求。

## 2 系统工作原理概述

机器人定位系统由线结构光自扫描装置和机器人两部分构成,结构示意图如图 1 所示。线结构光扫描装置安装在机器人的一侧,确保机器人的工作空间位于相机视场范围内,通过线结构光扫描,识别出目标对象<sup>[9]</sup>,获取目标对象在相机坐标系下的位姿。然后采用本文提出的机器人手眼关系与工具坐标系联合标定的方法,进一步获取目标对象在机器人工具坐标系下的位姿,根据定位结果,机器人机械臂带动末端执行工具移动至目标位姿,并进行相应的操作。

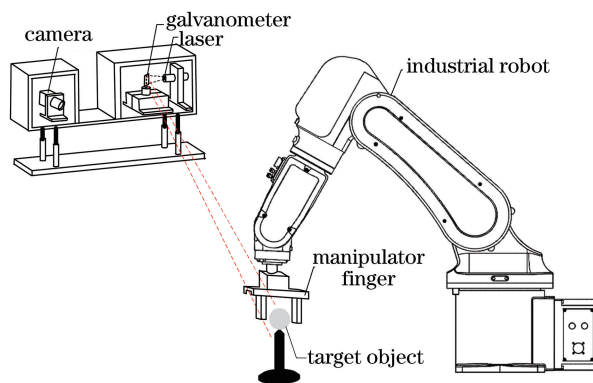


图 1 六轴工业机器人定位系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of six-axis industrial robot positioning system

其中,线结构光自扫描装置主要由工业相机、振镜、激光器三部分组成。激光器发出的线结构光平面经振镜反射投射到被测物体表面并形成激光光条,振镜转角可以通过计算机发出的电压信号精准控制。通过对相机拍摄到的图像进行处理计算,可以获得目标对象在相机坐标系下的位姿。

## 3 系统标定

系统的实现需要完成下面三项标定工作:

- 1) 线结构光自扫描装置参数标定,即建立振镜和相机之间的位姿转换关系;
- 2) 相机和机器人手眼关系标定,即建立视觉传感器模块与机器人之间的位姿转换关系;
- 3) 机器人工具坐标系标定,即建立工具与机器人法兰之间的位姿转换关系。

### 3.1 线结构光自扫描装置参数标定

图 2 为线结构光装置参数图。首先标定相机内参数,在相机工作范围内,拍摄多幅处于不同位姿下的二维棋盘靶标图像,采用张正友摄像机标定算法<sup>[10]</sup>标定相机内参数,包括相机焦距  $f$ ,主点坐标  $(u_0, v_0)$ ,以及畸变系数  $k_1, k_2, p_1, p_2$ 。

接下来标定相机坐标系和线结构光坐标系之间的齐次变换矩阵。控制振镜输入电压为  $U_0$ ,此时激光平

面经振镜反射后的出射角为  $\varphi_0$ ，在线结构光自扫描装置工作范围内，将棋盘靶标以不同位姿依次摆放，获取  $m$  ( $m \geq 2$ ) 幅棋盘靶标图像及相应位姿的光条图像；采用张正友摄像机标定算法计算相机坐标系与靶标坐标系间的外参数矩阵  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$ ，进而将提取到的激光光条中心<sup>[11-12]</sup> 转换到相机坐标系下；基于这  $m$  条不重合的激光光条，采用最小二乘法拟合激光平面，其平面法向量为  $\mathbf{n}_0 = (a_0, b_0, c_0)$ 。依次改变振镜控制电压为  $U_1, U_2, \dots, U_{n-1}$  ( $n \geq 2$ )，重复上述步骤，获取各个电压下的光平面在相机坐标系下的方程，光平面法向量为  $\mathbf{n}_i = (a_i, b_i, c_i)$ 。

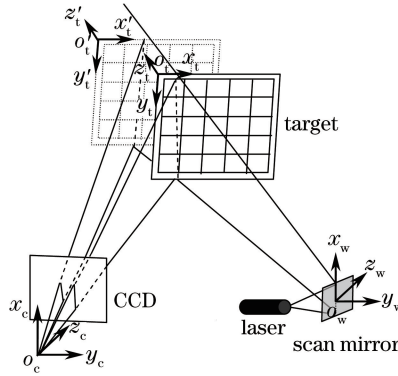


图 2 线结构光装置标定示意图

Fig. 2 Calibration schematic of structure-light equipment

各电压下出射光平面的交线即为振镜转轴，它与各光平面法向量垂直，以光平面法向量与振镜转轴的方向向量点乘积为优化目标，获得振镜坐标系  $x_w$  轴的方向向量。定义控制电压为  $U_0$  时光平面的法向量为振镜坐标系  $y_w$  轴方向向量，则  $z_w$  轴的方向向量为  $x_w \times y_w$ 。以振镜  $x_w$  轴与相机坐标系  $oyz$  平面的交点作为振镜坐标系的原点，那么到各光平面距离最小的点  $(0, t_y, t_z)$  即为振镜坐标原点在相机坐标系下坐标。

通过上述标定过程，获取相机坐标系与振镜坐标系的齐次变换矩阵，从而建立两坐标系的转换关系：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T} = \begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 \\ r_3 & r_4 & r_5 \\ r_6 & r_7 & r_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_0 \\ t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

出射光平面在振镜坐标系下的方程为

$$\cos \varphi \cdot y_w + \sin \varphi \cdot z_w = 0 \quad (2)$$

由相机小孔成像模型可知：

$$\begin{cases} \frac{z_c}{f} = \frac{x_c}{(u - u_0) / N_x} \\ \frac{z_c}{f} = \frac{y_c}{(v - v_0) / N_y} \end{cases} \quad (3)$$

联立(1)~(3)式可得

$$\begin{cases} \frac{u - u_0}{N_x} (r_6 x_w + r_7 y_w + r_8 z_w + t_2) = f (r_0 x_w + r_1 y_w + r_2 z_w + t_0) \\ \frac{v - v_0}{N_y} (r_6 x_w + r_7 y_w + r_8 z_w + t_2) = f (r_3 x_w + r_4 y_w + r_5 z_w + t_1) \\ \cos \varphi \cdot y_w + \sin \varphi \cdot z_w = 0 \end{cases} \quad (4)$$

通过求解(4)式方程组，即可求得目标点在振镜坐标系下坐标  $(x_w, y_w, z_w)$ 。根据相机坐标系和振镜坐标系之间的齐次变换矩阵，进而获取目标点在相机坐标系下坐标  $(x_c, y_c, z_c)$ 。

### 3.2 机器人手眼关系标定

Eye to Hand 式视觉系统手眼关系标定，传统方法是将棋盘靶标固定于机器人法兰末端，使得棋盘靶标随机器人运动而运动，相机拍摄处于不同位姿下的棋盘靶标，从而标定相机与机器人之间的位姿关系<sup>[13]</sup>。手眼关系标定结束后，根据机器人应用场景，在法兰末端安装所需工具，并通过六点法<sup>[14]</sup> 标定工具坐标系。

采用六点法标定机器人工具坐标系,其标定精度依赖于工具从不同方位对空间某一固定点的对准程度,标定精度难以保证,同时手眼关系和工具坐标系两者标定误差的累积会使得整个系统的误差进一步增大。

本文提出一种手眼关系和工具坐标系联合标定的方案。如图 3 所示,将棋盘靶标固定于工具一侧,棋盘靶标将跟随工具运动,相机拍摄各个位姿下的棋盘靶标,同时记录机器人在这些位置时的位姿。

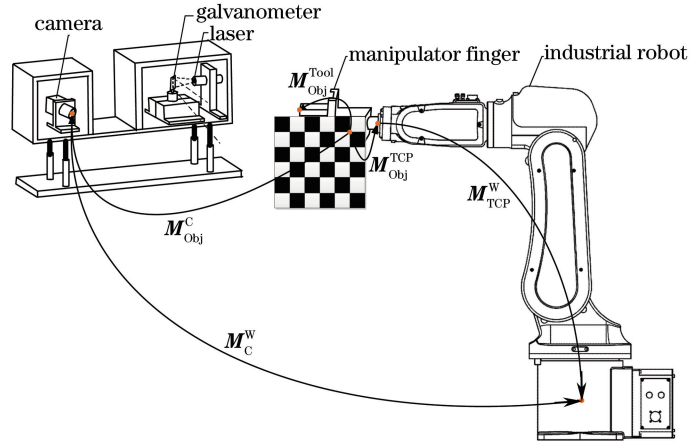


图 3 机器人手眼关系及工具坐标系联合标定方案

Fig. 3 Robot hand-eye relationship combined with tool coordinate system calibration method

记  $C_W$  为机器人基坐标系,定义于机器人基座; $C_C$  为摄像机坐标系,原点定义在相机光学中心; $C_{TCP}$  为机器人末端法兰坐标系; $C_{Obj}$  为平面靶标坐标系; $C_{Tool}$  为机器人工具坐标系。

空间中任意两坐标系之间的齐次变换矩阵可以表示为

$$M_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & t_x \\ n_y & o_y & a_y & t_y \\ n_z & o_z & a_z & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $\mathbf{R}$  为  $3 \times 3$  单位正交矩阵,代表两坐标系间的旋转关系; $\mathbf{T}$  为  $3 \times 1$  平移矩阵,代表两坐标系间的位置偏移量; $\mathbf{0}$  为  $3 \times 1$  零矩阵。

在标定过程中,机器人每移动一个位置,即可获取一个齐次变换矩阵  $M_{Obj}^C$  以及对应的齐次变换矩阵  $M_{TCP}^W$ 。在该系统中,各坐标系之间的齐次变化关系满足:

$$M_C^W M_{Obj}^C = M_{TCP}^W M_{Obj}^{TCP}, \quad (6)$$

式中  $M_{Obj}^C$  为平面靶标坐标系到相机坐标系之间的转换关系,即相机的外参数,根据机器人拍摄到的靶标图像和已经标定的相机内参数,采用张正友相机标定法可以求出; $M_C^W$  为相机坐标系到机器人坐标系之间的齐次变换矩阵,由于这两个坐标系是固定不动的,因而  $M_C^W$  唯一不变; $M_{Obj}^{TCP}$  为棋盘靶标坐标系到机器人法兰坐标系之间的齐次变换矩阵,这两个坐标系的位置随机器人的运动而改变,但相对位置固定不变,因而  $M_{Obj}^{TCP}$  也是唯一的; $M_{TCP}^W$  为机器人法兰坐标系到机器人基坐标系之间的齐次变换矩阵,可以通过机器人正向运动学求解<sup>[15]</sup>。

鉴于偏移量  $\mathbf{T}$  的数值量级远大于旋转矩阵  $\mathbf{R}$ ,直接求解齐次变换矩阵难以满足工程实际需要。依据齐次变换矩阵的数学特征和几何意义,将(6)式分解成旋转和平移两部分,采用两步法<sup>[16]</sup>依次求取齐次变换矩阵中的  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$ ,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_C^W & \mathbf{T}_C^W \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{Obj}^C & \mathbf{T}_{Obj}^C \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{TCP}^W & \mathbf{T}_{TCP}^W \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{Obj}^{TCP} & \mathbf{T}_{Obj}^{TCP} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

将(7)式展开可以得到

$$\mathbf{R}_C^W \mathbf{R}_{Obj}^C = \mathbf{R}_{TCP}^W \mathbf{R}_{Obj}^{TCP}, \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_C^W \mathbf{T}_{Obj}^C + \mathbf{T}_C^W = \mathbf{R}_{TCP}^W \mathbf{T}_{Obj}^{TCP} + \mathbf{T}_{TCP}^W. \quad (9)$$

首先求解旋转矩阵  $\mathbf{R}_C^W$ 、 $\mathbf{R}_{Obj}^{TCP}$ ，将  $\mathbf{R}_{Obj}^C$ 、 $\mathbf{R}_{TCP}^W$  代入(8)式，机器人每个位姿下可列出9个线性齐次方程，通过奇异值分解的方法求解超定方程组的最小二乘解。根据旋转矩阵实际物理意义，对求解得到的旋转矩阵的列向量进行单位化处理，并根据相机与机器人间的相对位置，确定旋转矩阵的符号。

完成旋转矩阵求解后，将  $\mathbf{R}_C^W$ 、 $\mathbf{T}_{Obj}^C$ 、 $\mathbf{R}_{TCP}^W$ 、 $\mathbf{T}_{TCP}^W$  代入(9)式求解两个齐次变换矩阵中的偏移量部分，机器人每个位姿下可列出三个线性非齐次方程，利用线性最小二乘法求解超定方程组，可以求得位置偏移量  $\mathbf{T}_C^W$ 、 $\mathbf{T}_{Obj}^{TCP}$ 。

### 3.3 机器人工具坐标系标定

在完成机器人手眼关系标定的基础上，进一步标定工具坐标系，即确定工具坐标系到机器人法兰坐标系的齐次变换矩阵。在上述手眼关系标定过程中，已经标定出靶标相对于机器人末端法兰的齐次变换矩阵  $\mathbf{M}_{Obj}^{TCP}$ ；同时依据机械抓手和靶标的加工尺寸，在忽略靶标固定误差的前提下，可以得到靶标到工具的齐次变换矩阵  $\mathbf{M}_{Obj}^{Tool}$ ，其中，

$$\mathbf{R}_{Obj}^{Tool} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{Obj}^{Tool} = \begin{bmatrix} t_0 \\ t_1 \\ t_2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

根据齐次变换关系可知，法兰坐标系到工具坐标系的齐次变换关系满足

$$\mathbf{M}_{TCP}^{Tool} = \mathbf{M}_{Obj}^{Tool} \mathbf{M}_{TCP}^{Obj}. \quad (11)$$

由于平面靶标坐标系、工具坐标系坐标轴易于对齐，且靶标与工具尺寸已知，因而固定偏差给  $\mathbf{M}_{Obj}^{Tool}$  带来的误差在允许范围内，小于工具坐标系独立标定带来的误差，满足工程应用需求。这种工具坐标系标定方案能够简化标定步骤，提高工作效率，同时避免了独立标定带来的累积误差，适用于跟随机械臂运动而自身不具有自由度的执行工具。

## 4 实验验证

线结构光自扫描装置由日本 Watec 公司生产的 WAT-902B 工业级低照度模拟相机、北京世纪索尼公司的 TS8720 光学振镜和加拿大 Stocker Yale 公司的 LASIRIS 系列线激光器组成。线结构自扫描装置工作距离约为 900 mm，测量范围约为 500 mm × 400 mm。工业机器人选取安徽埃夫特智能装备有限公司 ER3A-C60 型六轴机器人。采用上述标定方案，建立系统标定模型，对线结构光自扫描装置、机器人手眼关系和机器人工具坐标系进行参数标定。

### 4.1 系统定位精度检测方案

传统抓取实验仅能定性反映系统的可行性，为了定量地描述系统的定位精度，以三棱柱顶点作为目标点，通过比较法兰在机器人基坐标系下位姿的标定值与理论值之间的偏差，判定系统的定位精度。

将三棱柱摆放于系统工作范围内，通过手动示教的方式，移动工具坐标系原点至三棱柱顶点位置，通过机器人运动学正解获取此时法兰在机器人基坐标系下的位姿，并以此作为定位的理论值。

通过线结构光视觉引导，获取法兰在机器人基坐标系下位姿的标定值。由坐标系齐次变换关系可知，法兰坐标系到机器人坐标系间的齐次变换关系满足

$$\mathbf{M}_{TCP}^W = \mathbf{M}_C^W \mathbf{M}_{Tool}^C \mathbf{M}_{TCP}^{Tool}. \quad (12)$$

则旋转矩阵满足

$$\mathbf{R}_{TCP}^W = \mathbf{R}_C^W \mathbf{R}_{Tool}^C \mathbf{R}_{TCP}^{Tool}. \quad (13)$$

将通过机器人运动学正解求出的  $\mathbf{R}_{TCP}^W$  代入(13)式，求解此时工具坐标系相对于相机坐标系的旋转矩阵  $\mathbf{R}_{Tool}^C$ 。通过改变振镜电压信号对目标对象进行扫描，获取三棱柱顶点在相机坐标系下的坐标，并以此作为机械手坐标系到相机坐标系的位置偏移量  $\mathbf{T}_{Tool}^C$ 。由  $\mathbf{R}_{Tool}^C$ 、 $\mathbf{T}_{Tool}^C$  组成机械手坐标系到相机坐标系的齐次变换矩阵  $\mathbf{M}_{Tool}^C$ 。将  $\mathbf{M}_{Tool}^C$  代入(12)式，求解此时法兰坐标系与机器人基坐标系间齐次变换矩阵的标定值  $\mathbf{M}_{TCP}^W$ 。

### 4.2 多位置定位实验

通过检测目标点在工作范围内不同位置的定位误差以评价系统定位精度，设计了多位置定位实验，将三



棱柱依次摆放在如图 4 所示的 6 个位置。在每个位置下,机器人带动末端执行工具移动至三棱柱顶点,求解此时法兰到机器人基坐标系位置偏移量的理论值和标定值。

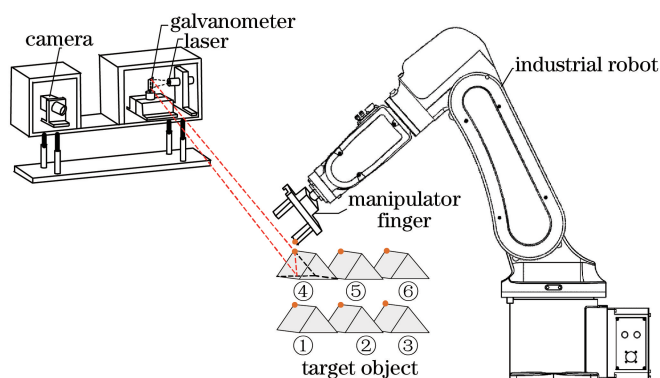


图 4 多位置三维定位实验示意图

Fig. 4 Schematic of multi-position 3D positioning experiment

实验结果如表 1 所示,其中第一列为目标点在机器人基坐标系下的坐标,第二列为机器人工具坐标系原点到达三棱柱顶点时,法兰坐标系相对于机器人基坐标系的姿态。通过比较法兰到机器人基坐标系位置偏移量的理论值与标定值的差异,评价系统定位偏差。由图 5 可以看出,当目标对象处于相机视野中心位置(前三次定位实验),系统定位精度较高,定位误差小于 3 mm;当目标对象处于视野边缘(后三次定位实验),系统定位精度较低,但定位误差仍小于 5 mm。

表 1 多位置定位测试结果

Table 1 Test results of multi-position positioning

Target position ( $x, y, z$ ) /mm	Robot orientation ( $a, b, c$ ) /( $^{\circ}$ )	Theoretical position ( $x, y, z$ ) /mm <direct kinematics>	Calibration position ( $x, y, z$ ) /mm <structured-light vision>
(474.429, -186.595, 443.95)	(5.428, 164.522, 4.641)	(499.751, -246.192, 566.967)	(498.348, -244.805, 566.541)
(577.128, -71.529, 446.526)	(22.094, 140.474, 25.096)	(558.726, -137.051, 568.804)	(558.648, -135.31, 567.921)
(548.654, 33.111, 444.301)	(19.232, 153.104, 35.801)	(570.214, -43.431, 560.124)	(572.490, -42.283, 561.040)
(547.92, -166.403, 562.246)	(0.033, 161.486, -15.514)	(553.224, -210.109, 692.885)	(551.140, -207.42, 691.976)
(591.089, -61.895, 562.214)	(-0.189, 155.912, -8.296)	(588.099, -115.285, 691.041)	(585.637, -112.513, 688.924)
(508.493, -4.799, 559.159)	(-0.5376, 163.615, -4.07)	(524.308, -65.801, 685.493)	(523.073, -63.896, 683.279)

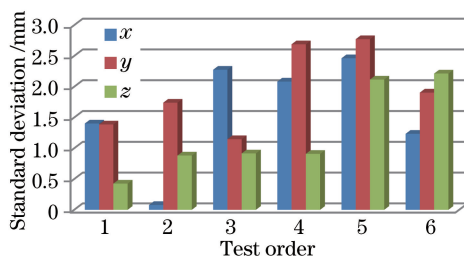


图 5 多位置三维定位误差

Fig. 5 Multi-position 3D positioning error

### 4.3 多角度定位实验

在线结构光视觉引导的工业机器人定位系统中,工业机器人根据目标物体摆放姿态相应地选择合理的抓取姿态,为验证系统在不同抓取姿态下的定位精度,设计了多角度定位实验,如图 6 所示。将三棱柱依次摆放在系统工作范围内的某个位置,机器人带动末端执行工具移动以不同姿态移动至三棱柱顶点,并分别求解各姿态下法兰到机器人基坐标系位置偏移量的理论值和标定值。

实验结果如表 2 所示,其中 Robot orientation 为机器人工具坐标系原点到达三棱柱顶点时,法兰坐标系相对于机器人基坐标系的姿态。由图 7 可以看出,工业机器人对不同位姿目标对象的定位精度稳定,定位误

差基本不受目标对象姿态的影响,能够实现对随机位姿目标对象的三维定位。

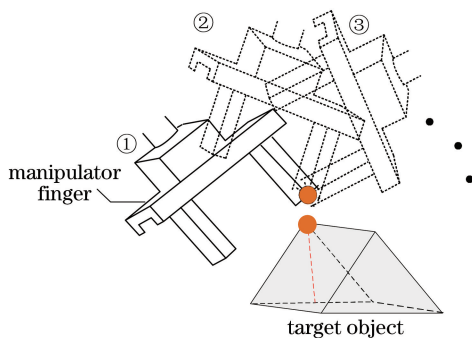


图 6 多角度三维定位实验示意图

Fig. 6 Schematic of multi-angle 3D positioning experiment

表 2 多角度定位测试结果

Table 2 Test results of multi-angle positioning

Case	Robot orientation ( $a, b, c$ ) / ( $^{\circ}$ )	Theoretical position	Calibration position
		( $x, y, z$ ) / mm <direct kinematics>	( $x, y, z$ ) / mm <structured-light vision>
1	(136.791, -8.648, 80.572)	(579.511, -2.911, 680.309)	(578.186, -1.227, 678.187)
2	(137.352, -0.0278, 88.499)	(570.999, -13.527, 681.283)	(569.872, -11.876, 679.697)
3	(-18.1693, 141.819, -36.936)	(565.018, -83.5283, 685.655)	(564.056, -82.532, 683.79)
4	(-129.234, 19.867, -116.530)	(640.728, -113.045, 689.234)	(639.366, -112.189, 686.938)
5	(55.426, 152.065, 60.467)	(616.607, -114.287, 690.588)	(615.138, -112.703, 689.193)
6	(36.111, 134.354, 33.402)	(588.541, -116.274, 685.161)	(587.173, -114.209, 683.83)

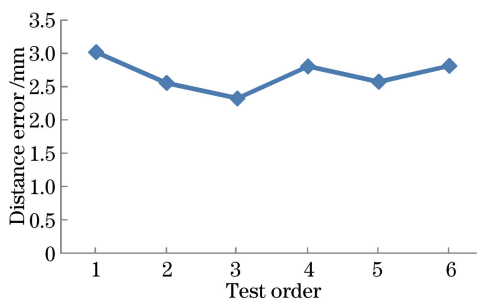


图 7 多角度三维定位误差

Fig. 7 Multi-angle 3D positioning error

双目立体视觉是目前引导工业机器人的三维定位的主要解决方案,定位误差在 8 mm 以内<sup>[4]</sup>。多位置定位和多角度定位实验结果表明,线结构光视觉引导的工业机器人定位误差小于 5 mm,且能够准确定位各个姿态的目标物体。因而线结构光视觉引导工业机器人定位不仅避免了双目视觉的立体匹配问题,而且提高了系统定位精度。

## 5 结 论

设计了一种线结构光视觉引导的机器人定位系统,其主要特点如下:

1) 选用线结构光三维视觉获取目标对象三维信息,避免了双目立体视觉的目标点匹配问题,能够在系统环境复杂或目标对象缺乏纹理的情况下工作;将线结构光自扫描装置固定于机器人一侧,解决了 Eye in hand 式手眼系统因视野变化易丢失目标物体的问题。

2) 使用二维棋盘靶标完成了线结构光自扫描装置标定、机器人手眼关系标定、机器人工具坐标系标定,标定方法操作简便,不需要额外的辅助设备,能够适用于工业现场标定。

3) 机器人定位实验结果表明,采用所提出的系统参数标定方案,系统对较远距离(约700~1100 mm)目标对象的三维定位误差在5 mm以内,定位精度满足工业抓取、搬运等作业任务要求,对于提高工业生产效率和自动化水平有重要的意义。

## 参 考 文 献

- 1 Lin Yizhong, Liu Qingguo, Xu Jun, *et al.* Research status and development trend of industrial robot off-line programming system[J]. *Mechatronics*, 2015, 7: 8-10.  
林义忠, 刘庆国, 徐俊, 等. 工业机器人离线编程系统研究现状与发展趋势[J]. *机电一体化*, 2015, 7: 8-10.
- 2 Xia Qunfeng, Peng Yonggang. Review on application research of robots scraping system based on visual[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(6): 697-701.  
夏群峰, 彭勇刚. 基于视觉的机器人抓取系统应用研究综述[J]. *机电工程*, 2014, 31(6): 697-701.
- 3 Zhai Jingmei, Dong Pengfei, Zhang Tie. Positioning and grasping system design of industrial robot based on visual guidance[J]. *Machine Design and Research*, 2014, 30(5): 45-49.  
翟敬梅, 董鹏飞, 张铁. 基于视觉引导的工业机器人定位抓取系统设计[J]. *机械设计与研究*, 2014, 30(5): 45-49.
- 4 Ishibashi S. The stereo vision system for an underwater vehicle[C]. *Oceans*, 2009: 1-6.
- 5 Schmidt B, Wang L. Automatic work objects calibration via a global-local camera system[J]. *Robot Cim-Int Manuf*, 2014, 30(6): 678-683.
- 6 Shang Dawei, Xie Zexiao, Wang Haoyuan, *et al.* Research of a laser projector self-scanning measurement system[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*, 2010, 27(10): 30-33.  
商大伟, 解则晓, 王浩元, 等. 一种线结构光自扫描测量系统的研究[J]. *机电工程*, 2010, 27(10): 30-33.
- 7 Xie Zexiao, Li Xuyong, Xin Shaohui, *et al.* Underwater line structured-light self-scan three-dimensional measuring technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(8): 2010-2014.  
解则晓, 李绪勇, 辛少辉, 等. 水下线结构光自扫描三维测量技术[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 2010-2014.
- 8 Su Xianyu, Zhang Qican, Chen Wenjing. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209001.  
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209001.
- 9 Xie Zexiao, Pan Chengcheng, Chi Shukai, *et al.* Underwater man-made object localization based on line feature of image and surface feature of point cloud[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2015, 20(8): 1051-1061.  
解则晓, 潘成成, 迟书凯, 等. 基于图像线特征和点云面特征的水下人造目标定位[J]. *中国图象图形学报*, 2015, 20(8): 1051-1061.
- 10 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 11 Li Fengjiao, Li Xiaojing, Liu Zhen. A multi-scale analysis based method for extracting coordinates of laser light stripe centers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1110002.  
李凤娇, 李小菁, 刘震. 基于多尺度分析的激光光条中心点坐标提取方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1110002.
- 12 Jiang Yongfu, Jiang Kaiyong, Lin Junyi. Extrication method for sub-pixel center of linear structured light stripe[J]. *Laser & Optoelectronics Process*, 2015, 52(7): 071502.  
江永付, 江开勇, 林俊义. 线结构光光条中心亚像素精确提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 071502.
- 13 Schmidt B, Wang L. Depth camera based collision avoidance via active robot control[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2014, 33(4): 711-718.
- 14 Xiong Shuo, Ye Bosheng, Jiang Ming. Study of robot tool coordinate frame calibration[J]. *Machinery & Electronics*, 2012, 6: 60-63.  
熊硕, 叶伯生, 蒋明. 机器人工具坐标系标定算法研究[J]. *机械与电子*, 2012, 6: 60-63.
- 15 Qi Fei, Ping Xueliang, Liu Jie, *et al.* Research of calibration method on industrial robot[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2015, 43(21): 32-36.  
齐飞, 平雪良, 刘洁, 等. 关于工业机器人标定方法的研究[J]. *机床与液压*, 2015, 43(21): 32-36.
- 16 Xie Fazhong, Wu Nianxiang. Robot calibration technology by two steps hand-eye relationship[J]. *Journal of Changchun College of Engineering (Natural Science Edition)*, 2012, 13(3): 112-116.  
谢发忠, 吴年祥. 两步法标定机器人手眼关系研究[J]. *长春工程学院学报(自然科学版)*, 2012, 13(3): 112-116.