

文章编号: 1001-3806(2018)06-0751-07

## 六自由度姿态变换视觉实验平台及应用

王福斌<sup>1,3</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 程月<sup>2</sup>, 刘海涛<sup>1</sup>, 徐傲<sup>1</sup>

(1. 华北理工大学电气工程学院, 唐山 063210; 2. 唐山劳动技师学院电气工程系, 唐山 063300; 3. 卡尔加里大学机械及制造工程系, 卡尔加里 T2N 1N4)

**摘要:** 为了适应生产线上不同摆放姿态下工件的视觉识别, 实现基于视觉的机器人工件定位及抓取, 构建了六自由度工件姿态变换模拟实验平台运动学模型及视觉系统模型, 通过坐标变换实现工件姿态参量的测量。建立了六自由度姿态变换实验平台坐标系, 通过3个滑动副、3个转动副, 构建了基于Denavit-Hartenberg(D-H)方法的六自由度姿态变换实验平台运动学模型, 并得到了D-H参量表、各个关节的变换矩阵及实验平台基座到末端的总变换矩阵。基于小孔成像原理, 构建了姿态变换实验平台视觉系统的内、外参量模型, 获得了工件表面点与图像点间的内参量关系矩阵及工件坐标系与相机坐标间的外关系矩阵。由激光环形光条图像, 得到工件表面在摄像机坐标系中的法向量, 并通过坐标系间的变换得到工件表面在世界坐标系中的法向量, 进而推算出工件的姿态参量。结果表明, 姿态参量的横滚角 $\theta$ 平均误差为 $0.373^\circ$ , 俯仰角 $\varphi$ 平均误差为 $0.253^\circ$ , 偏转角 $\xi$ 平均误差为 $0.673^\circ$ 。被测工件的姿态测量值与真实值基本吻合, 满足不同姿态下的工件视觉测量要求。

**关键词:** 测量与计量; 姿态变换; 视觉测量; 六自由度; Denavit-Hartenberg 模型

**中图分类号:** TP242.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jigs.issn.1001-3806.2018.06.005

## Six-DOF attitude transform visual experiment platform and its application

WANG Fubin<sup>1,3</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, CHENG Yue<sup>2</sup>, LIU Haitao<sup>1</sup>, XU Ao<sup>1</sup>

(1. Department of Automation, School of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tangshan Labor Technician College, Tangshan 063300, China; 3. Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Calgary, Calgary T2N 1N4, Canada)

**Abstract:** In order to adapt the visual recognition of workpiece with different postures in production line and realize the localization and grasping of workpiece based on vision robot, the kinematics model and the visual system model of six degree of freedom(6-DOF) workpiece attitude transformation simulation experiment platform were constructed. The measurement of attitude parameters of workpiece was realized by coordinate transformation. 6-DOF attitude transformation experimental platform coordinate system was set up. Kinematics model of six degree of freedom attitude transformation experiment platform based on Denavit-Hartenberg(D-H) method was constructed through 3 sliding pairs and 3 rotational pairs. D-H parameter table, transformation matrix of each joint and total transformation matrix of experimental platform from the base to the end were obtained. Based on the principle of small hole imaging, the internal and external parameter model of attitude transformation experimental platform was constructed. The internal parameter relation matrix between workpiece surface point and image point and the external relation matrix between workpiece coordinate system and camera coordinate system were obtained. The normal vector of workpiece surface in camera coordinate system was obtained from the image of laser ring light strip. And then, the normal vector of workpiece surface in the world coordinate system was obtained through the transformation of coordinate system. Finally, attitude parameters of workpiece were calculated. The results show that average error of roll angle is  $0.373^\circ$ , average error of pitch angle is  $0.253^\circ$  and average error of deflection angle is  $0.673^\circ$ . The measured value of workpiece is basically consistent with the true value, which meets the requirements of workpiece vision measurement under different postures.

**Key words:** measurement and metrology; attitude transformation; vision measurement; six degree of freedom; Denavit-Hartenberg model

作者简介: 王福斌(1968-), 男, 博士, 副教授, 主要从事数字图像处理、机器人视觉伺服控制、飞秒激光微纳加工研究。  
E-mail: wfb2313@126.com  
收稿日期: 2017-12-25; 收到修改稿日期: 2018-01-22

## 引言

自动化生产线上的工件姿态测量及抓取是重要工艺环节。在姿态变换实验平台的研究方面, HUANG<sup>[1]</sup>

等人采用欧拉角物体姿态对机器人的空间运动进行描述。JIANG 等人<sup>[2]</sup>研究了海豚尾鳍俯仰-沉浮运动的数学模型,并建立了描述豚尾各运动参量之间关系的运动学方程。CHEN 等人<sup>[3]</sup>提出了圆结构光视觉姿态测量模型,基于单目视觉和激光圆结构光实现了目标姿态测量。YU 等人<sup>[4]</sup>采用中轴线法对火箭空间轴对称目标的俯仰角和偏航角进行测量,并进行了误差分析;利用目标图像信息提高测量精度,采用间接方法提取目标中轴线,避免了多相机目标匹配问题。LI 等人<sup>[5]</sup>对相机系统进行了标定,并用单相机对六自由度(six-degree of freedom, 6-DOF)机构的6个自由度进行了基于图像的位移测量;将6个自由度位移的仿真结果作为理想数据与实测数据进行比较获得测量误差。

国外学者在20世纪80年代前后,提出了姿态测量中的透视 $n$ 点定位问题(perspective- $n$ -point, PNP)。该方法为基于单帧图像的视觉解算方法:已知被测目标物体上 $n$ 个特征点中任意两个点间的对应坐标关系,根据摄像机的成像模型可以确定目标物体上这 $n$ 个特征点在摄像机坐标系中的坐标,再利用标定后的摄像机内外参量求出特征点在世界坐标系中的坐标值,最终解算出目标物体的姿态参量。1981年, FISCHLER 和 BOLLES 建立了数学模型,提出了一种封闭式解法,为视觉姿态测量提供了理论基础<sup>[6]</sup>。2009年, LEPETIT 等人提出了一种对 $N \geq 4$ 的 PNP 问题均适用的解算方法,将所有特征点表示为4个虚拟控制点的 PNP 问题非迭代算法,将 PNP 问题简单地转换为估计解算4个虚拟控制点在摄像机坐标系的坐标值问题<sup>[7]</sup>。STEWÉNIUS 等人<sup>[8]</sup>提出了5点相对姿态的定位算法,且该方法多数情况下优于直接法。

为实现工件的姿态变换,并测量不同变换条件下对应的工件姿态参量,设计了6-DOF 姿态变换实验平台,实验平台具有两种基本的实验功能:工件的各种姿态变换,由变换平台3个平移自由度及3个旋转自由度组合实现;视觉测量系统,由单目相机配合激光结构光实现。

构建的实验平台由 $x$ 方向平移台、 $y$ 方向平移台及 $z$ 方向升降台组成位置调节部件;由 $\gamma$ 方向水平旋转台、 $\beta$ 方向俯仰转角台及 $\alpha$ 方向侧倾转角台构成姿势调节部件,通过滑动副及旋转副的组合运动,实现工件的不同姿态变换。在分析 Denavit-Hartenberg (D-H) 模型原理基础上,构建了姿态变换实验平台的运动学数学模型,求得了 D-H 模型参量及姿态传递变换矩阵;同时,依据小孔成像机理,构建了视觉系统内外参

量模型,为基于实验平台的工件姿态视觉测量提供了条件<sup>[9-10]</sup>。通过对环形激光结构光图像的分割,获得环形光条,并用光条图像的法向量结合坐标系间的转换,得到工件表面在世界坐标系中的法向量,进而反演实现工件姿态的计算。

## 1 六自由度姿态变换实验平台原理

六自由度姿态模拟平台如图1所示。实验平台由 $x$ 方向平移台、 $y$ 方向平移台、 $z$ 方向升降台组成位置调节系统;由 $\gamma$ 方向 $360^\circ$ 旋转台、 $\beta$ 方向转角台、 $\alpha$ 方向转角台构成姿势调节系统。

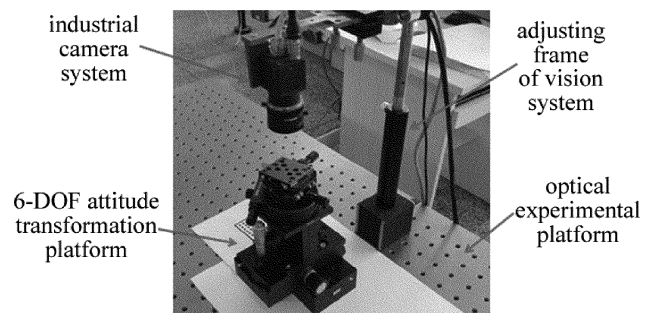


Fig. 1 Functional component of 6-DOF attitude simulation experiment platform system

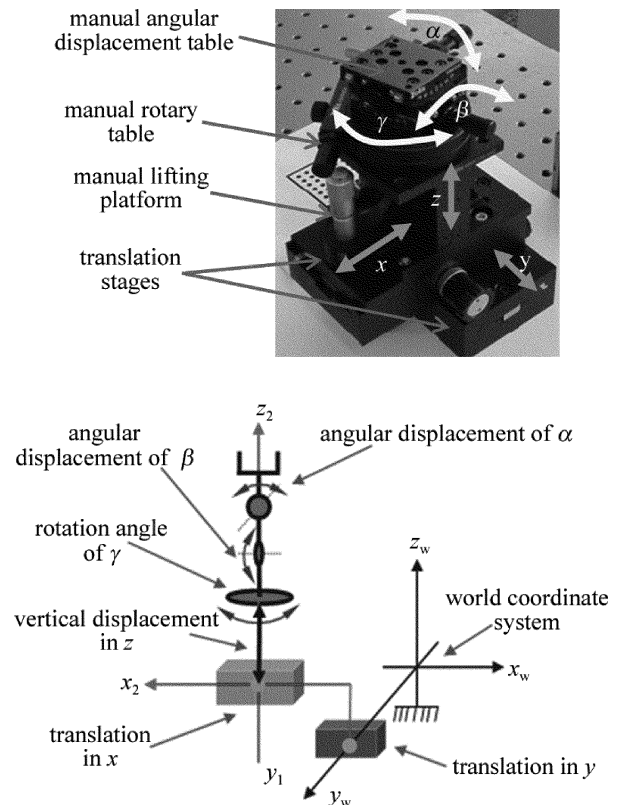


Fig. 2 6-DOF attitude simulation experiment platform and its coordinate system

由3个直线运动、3个旋转运动的组合,具备位置

及姿态调整功能,末端工作平面可模拟空间限定范围内的任意位置、任意姿态。姿态变换平台与视觉系统相结合,可实现不同姿态下的工件视觉识别及视觉测量等功能。

图 2 为姿态变换平台 6 个自由度的功能部件组合及其坐标系示意图。主要技术参量为:绕  $x$  轴的旋转角度  $\alpha = \pm 15^\circ$ ,分辨率  $0.1^\circ$ ;绕  $y$  轴旋转的角度  $\beta = \pm 15^\circ$ ,分辨率  $0.1^\circ$ ;绕  $z$  轴旋转的角度  $\gamma = 360^\circ$ ,分辨率  $0.1^\circ$ 。沿  $x$  轴方向的直线运动范围为  $75\text{mm}$ ,分辨率  $0.01\text{mm}$ ;沿  $y$  轴方向的直线运动范围为  $75\text{mm}$ ,分辨率  $0.02\text{mm}$ ;沿  $z$  轴方向的直线运动范围为  $13\text{mm}$ ,分辨率  $0.01\text{mm}$ 。

## 2 六自由度姿态变换实验平台模型

D-H 方法适用于任何由关节和连杆组成的机器人模型构建,而机器人本质上大多由一组关节和连杆构成。当所有关节变量为已知时,可用正运动学模型确定机器人末端位姿;相反,若对末端位置及姿态有特定要求,则可用逆运动学实现对每一关节变量的逆向求解。

### 2.1 机器人关节变换的 D-H 建模原理

六自由度模拟平台可以抽象为连杆-关节机器人结构,从而应用 D-H 方法进行模型构建。正常情况下,机器人的每个关节有一个自由度,可为滑动的或转动的。图 3 为典型的用 D-H 法表示的机器人连杆-关节模型结构。图中连续的 3 个关节由两个连杆连接,关节分别为  $J_n, J_{n+1}$  及  $J_{n+2}$ ,连杆分别为  $n$  及  $n+1$ 。3 个旋转关节的  $z$  轴与关节旋转方向之间遵循右手螺旋法则,旋转角  $\theta$  为关节变量;若为滑动关节,则沿  $z$  轴的连杆滑动长度定义为关节变量<sup>[11-12]</sup>。关节的  $x$  轴一般定义在两个相邻关节轴线的公垂线上。图中,关节  $J_n$  与  $J_{n+1}$  之间的关节偏移量为  $a_n$ ,关节  $J_{n+1}$  与  $J_{n+2}$  之

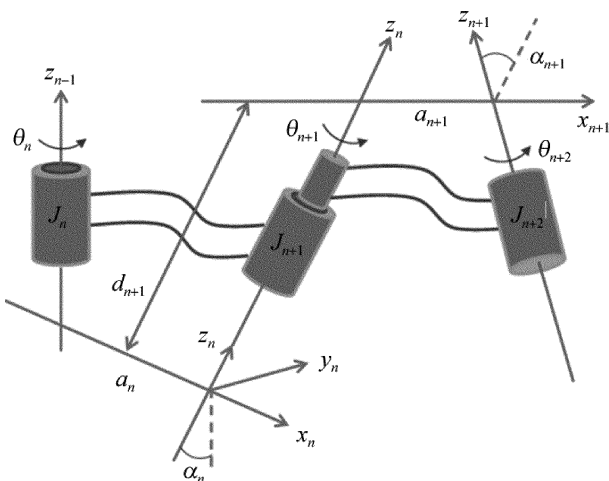


Fig. 3 Typical D-H bar-joint model for robot

间的关节偏移量为  $a_{n+2}$ ;两相邻的公垂线之间的距离为  $d$ ,两相邻的关节的  $z$  轴之间夹角定义为关节扭转角,分别为  $\alpha_n$  和  $\alpha_{n+1}$ 。

为实现关节之间的变换,在每一个关节上建立一个参考坐标系。从关节  $J_{n+1}$  到关节  $J_{n+2}$  的变换过程为<sup>[13-14]</sup>:(1)关节  $J_{n+2}$  绕关节  $J_{n+1}$  旋转  $\theta_{n+1}$  角度,有旋转算子  $\text{rot}(z_n, \theta_{n+1})$ ,使得  $x_n$  轴与  $x_{n+1}$  轴平行,此时  $x_n$  轴与  $x_{n+1}$  轴在同一平面上,将  $x_{n+1}$  轴平移  $d_{n+1}$ ,有平移算子  $\text{trans}(0, 0, d_{n+1})$ ,即可使二者重叠;(2)将关节  $J_{n+1}$  沿  $x_n$  轴平移  $a_{n+1}$ ,记为  $\text{trans}(a_{n+1}, 0, 0)$ ,使得  $x_n$  轴与  $x_{n+1}$  轴的坐标原点重合;(3)通过旋转  $\alpha_{n+1}$  角度,将  $z_n$  轴绕  $x_{n+1}$  轴转到与  $z_{n+1}$  轴重叠,记为  $\text{rot}(x, a_{n+1})$ ,此时,关节  $J_{n+1}$  的坐标系与关节  $J_{n+2}$  的坐标系重合,实现了坐标系之间的转换。

从关节  $J_{n+1}$  到关节  $J_{n+2}$  的变换矩阵记作  ${}^n T_{n+1}$ ,对应的矩阵  $A_{n+1}$  由上述变换过程各自对应的矩阵右乘得到,有:

$$\begin{aligned}
 {}^n T_{n+1} &= A_{n+1} = \text{rot}(z_n, \theta_{n+1}) \times \text{trans}(0, 0, d_{n+1}) \times \\
 &\quad \text{trans}(a_{n+1}, 0, 0) \times \text{rot}(x, \alpha_{n+1}) = \\
 &\begin{bmatrix} \cos\theta_{n+1} & -\sin\theta_{n+1} & 0 & 0 \\ \sin\theta_{n+1} & \cos\theta_{n+1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_{n+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\
 &\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{n+1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_{n+1} & -\sin\alpha_{n+1} & 0 \\ 0 & \sin\alpha_{n+1} & \cos\alpha_{n+1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &\begin{bmatrix} \cos\theta_{n+1} & -\sin\theta_{n+1}\cos\alpha_{n+1} & \sin\theta_{n+1}\sin\alpha_{n+1} & a_{n+1}\cos\theta_{n+1} \\ \sin\theta_{n+1} & \cos\theta_{n+1}\cos\alpha_{n+1} & -\cos\theta_{n+1}\sin\alpha_{n+1} & a_{n+1}\sin\theta_{n+1} \\ 0 & \sin\alpha_{n+1} & \cos\alpha_{n+1} & d_{n+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

对于具有 6 个关节的机器人,从机器人的基座  $R$  开始,到机器人手爪末端的变换过程可表示为:

$${}^R T_6 = {}^R T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 \quad (2)$$

可知,具有 6 个自由度的机器人,每个自由度对应一个  $A$  矩阵。

### 2.2 六自由度模拟平台 D-H 运动学模型

六自由度姿态变换平台坐标系如图 4 所示。坐标系由 3 个滑动副、3 个转动副组成。每两个运动副公垂线之间的距离分别为  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$ 。按右手螺旋法则,确定关节变量旋转角  $\theta_1 \sim \theta_6$  及两相邻关节

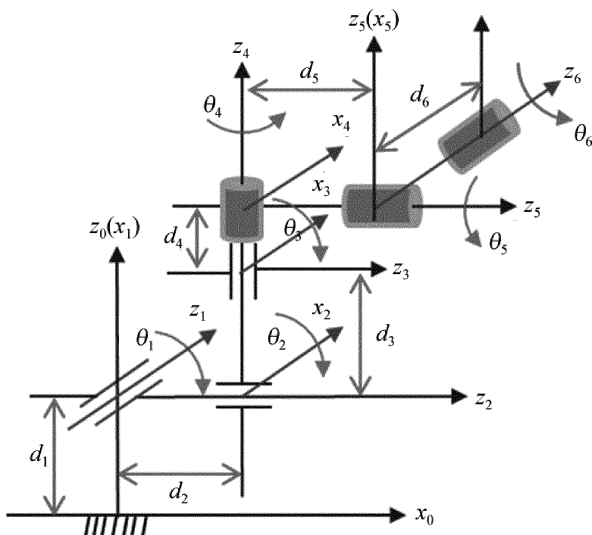


Fig. 4 D-H coordinate system of attitude simulation experiment platform

的  $z$  轴之间关节扭转角  $\alpha_0 \sim \alpha_5$ 。

由坐标系,得到姿态变换平台从平台的基座到末端之间变换的 D-H 参量表,如表 1 所示。

Table 1 D-H parameter table of attitude simulation experiment platform

connecting rod $i$	angle $\theta_i / (^\circ)$	spacing $d_i$	connecting rod length $a_{i-1} / \text{mm}$	twist angle $\alpha_{i-1} / (^\circ)$
1	-90	0	0	-90
2	-90	$d_2$	0	-90
3	0	$d_3$	0	-90
4	0	$d_4$	0	0
5	90	$d_5$	0	90
6	0	$d_6$	0	90

由 D-H 参量表,求得各个关节的变换矩阵分别为:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & a_2 \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & a_2 \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & a_3 \cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & a_3 \sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & \sin\theta_4 & 0 \\ \sin\theta_4 & 0 & -\cos\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & 0 & -\sin\theta_5 & 0 \\ \sin\theta_5 & 0 & \cos\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由(3)式可得基座 R 到末端 H 总的变换矩阵为:

$${}^R T_H = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_2 + d_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 3 六自由度姿态变换平台视觉系统模型

#### 3.1 小孔成像模型

姿态变换平台的视觉系统采用单目相机结合激光结构光结构,可实现对平台上的工件进行姿态识别及尺寸测量。相机的单目小孔成像模型如图 5 所示。图中,  $x_w y_w z_w$  为世界坐标系,相机光轴中心点  $O$  与  $x_c, y_c, z_c$  轴构成相机直角坐标系,相机等效成像平面  $\Gamma$  的坐标原点  $O_0$  是以像素为单位的图像坐标系的原点,  $(u, v)$  为图像像素坐标系中任一点的坐标,  $O_1$  是以 mm 为单位的图像坐标系原点,其像素坐标记为  $(u_0, v_0)$ 。  $OO_1$  即为相机焦距  $f$ 。设景物点  $p_1$  在相机坐标系下的坐标为  $(x_c, y_c, z_c)$ ,  $p_1$  点在成像平面上的成像点  $p_2$  的坐标为  $(X, Y, Z)$  [15-16]。

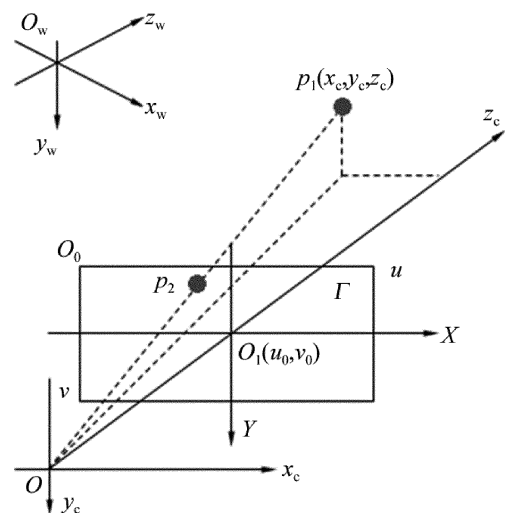


Fig. 5 Pinhole imaging coordinate system of experimental platform

采用齐次坐标与矩阵形式,成像平面上的任一点

在  $u-O_0-v$  及  $X-O_1-Y$  坐标系间的坐标关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dX} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dY} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

景物点  $p_1$  与其成像点  $p_2$  间的坐标关系为:

$$\begin{cases} x_c/z_c = X/Z = X/f \\ y_c/z_c = Y/Z = Y/f \end{cases} \quad (6)$$

由(5)式将成像平面上的成像点  $(X, Y)$  转换为图像点  $(u, v)$ , 再代入(6)式, 得到相机内参量模型:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & u_0 \\ 0 & k_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c/z_c \\ y_c/z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{in} \begin{bmatrix} x_c/z_c \\ y_c/z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $k_x = \frac{f}{dX}$  是  $X$  轴方向的放大系数;  $k_y = \frac{f}{dY}$  是  $Y$  轴

方向的放大系数;  $\mathbf{M}_{in}$  是相机内参量矩阵, 描述工件表面点与图像点间的关系。外参量模型描述工件表面点坐标与相机坐标间的关系, 坐标系  $x_w-O_w-y_w-z_w$  在坐标系  $x_c-O-y_c-z_c$  中的关系表达式构成相机外参量模型:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{p} \\ \mathbf{o}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_w \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,  $(x_w, y_w, z_w)$  为景物点在世界坐标系中的坐标;  $\mathbf{M}_w$  是摄像机外参量矩阵;  $\mathbf{n} = [n_x \ n_y \ n_z]^T$  为  $x_w$  轴在相机坐标系  $x_c-O-y_c-z_c$  中的方向向量;  $\mathbf{o} = [o_x \ o_y \ o_z]^T$  为  $y_w$  轴在相机坐标系  $x_c-O-y_c-z_c$  中的

方向向量;  $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}$  为旋转矩阵,  $\mathbf{a} =$

$[a_x \ a_y \ a_z]^T$  是  $z_w$  轴在相机坐标系  $x_c-O-y_c-z_c$  中的方向向量;  $\mathbf{p} = [p_x \ p_y \ p_z]^T$  为世界坐标系  $x_w-O_w-y_w-z_w$  的坐标原点在相机坐标系  $x_c-O-y_c-z_c$  中的平移量<sup>[17-18]</sup>。

### 3.2 环形激光结构光系统

为测量工件在变换平台上的姿态, 采用圆结构光激光器、相机构成结构光系统, 如图6所示。图6a为激光结构光视觉测量原理及相机与激光器之间的几何安装结构; 图6b为相机与激光投射器的整体几何模型。为保证激光投射器轴线与摄像机的光轴平行, 采用特制的安装底板, 将相机与激光器分别固定在底板

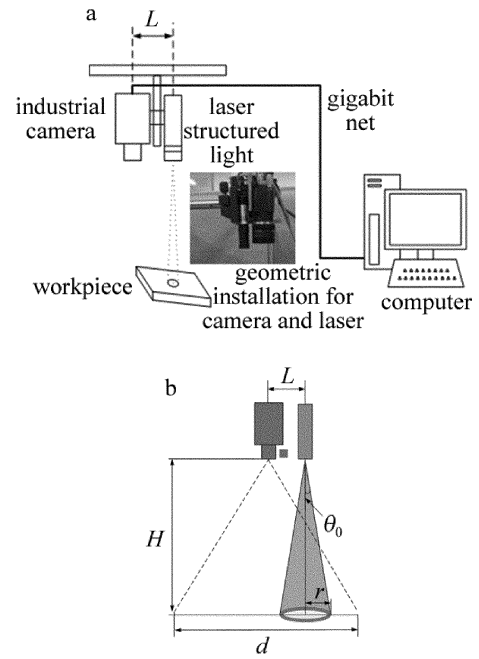


Fig. 6 a—geometric installation structure b—geometric installation model 的两侧, 保证二者之间的几何尺寸。

图6中, 相机光轴与激光圆环轴心间距为  $L$ , 圆环激光出射半角为  $\theta_0$ , 相机物距为  $H$ , 激光投射器在工件表面投影为圆环形结构光条, 半径为  $r$ , 并有:

$$r = H \tan \theta_0 \quad (9)$$

在构建相机与激光投射器相对位置时, 要保证激光圆环在视场范围内, 要求相机光轴与激光圆环轴心间距  $L$  满足:

$$L < S \times H / (2f) - H \tan \theta_0 \quad (10)$$

式中,  $S$  为镜头靶面尺寸,  $f$  为镜头焦距。

空间工件的姿态由横滚角、俯仰角和偏转角3个自由度确定。设  $\mathbf{n}_w = (n_{w,x}, n_{w,y}, n_{w,z})$  为空间工件表面的法向量, 根据几何三角关系可推算出工件的姿态参量横滚角  $\theta$ 、俯仰角  $\varphi$  和偏转角  $\xi$ :

$$\begin{cases} \theta = 90^\circ - |\arctan(n_{w,z}/n_{w,y})| \\ \varphi = 90^\circ - |\arctan(n_{w,z}/n_{w,x})| \\ \xi = \arctan(n_{w,y}/n_{w,x}) \end{cases} \quad (11)$$

激光圆环光条中心坐标  $(x_0', y_0', z_0')$  及光条法向量  $\mathbf{n}' = (n_x', n_y', n_z')$  分别为:

$$\begin{cases} (x_0', y_0', z_0') = \left[ r \sqrt{\frac{|\lambda_3| (|\lambda_1| - |\lambda_2|)}{|\lambda_1| (|\lambda_1| + |\lambda_3|)}}, \right. \\ \left. 0, r \sqrt{\frac{|\lambda_1| (|\lambda_2| + |\lambda_3|)}{|\lambda_3| (|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \right] \\ [n_x' \ n_y' \ n_z'] = \\ \left[ \pm \sqrt{\frac{(|\lambda_1| - |\lambda_2|)}{(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \quad 0 \quad -\sqrt{\frac{(|\lambda_2| + |\lambda_3|)}{(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \right] \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  为矩阵的特征值,  $r$  为圆结构光投射在工件表面的半径<sup>[19-20]</sup>。

### 4 工件端面姿态测量

实验时,将工件置于姿态变换实验平台上,调节姿态变换平台的3个姿态角参量进行测量,如图7a所示。图7b为采集的3种不同姿态的工件图像。图7c为利用阈值分割及形态学膨胀处理方法将激光环形光条区域从工件图像中分割出来。对结构光光条区域应用Hessian矩阵提取结构光光条中心的亚像素坐标,再利用最小二乘椭圆拟合法将转换到成像平面坐标系中的亚像素中心坐标拟合成椭圆方程,见图7d。最后由椭圆拟合结果测算工件姿态。

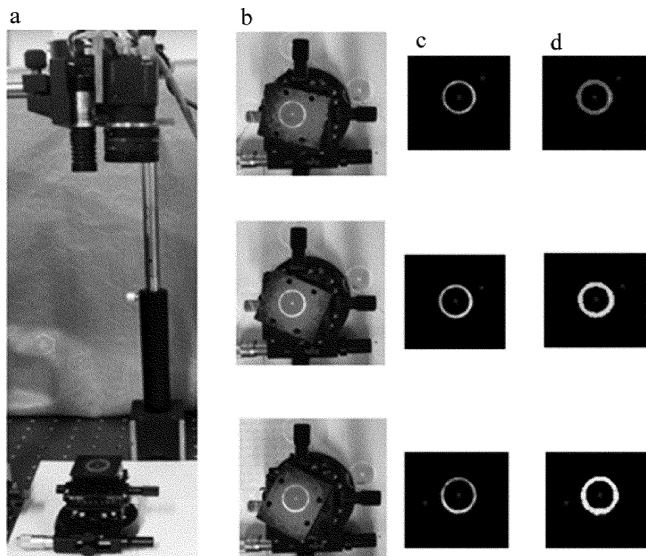


Fig. 7 Image acquisition and processing for circular laser stripe

被测工件的姿态参量  $(\theta, \varphi, \xi)$  实验测量值如表2所示。经实验可得姿态角的测量值与给定值间的平均误差为:姿态参量的横滚角  $\theta$  平均误差  $0.373^\circ$ , 俯仰角  $\varphi$  平均误差  $0.253^\circ$ , 偏转角  $\xi$  平均误差  $0.673^\circ$ 。

Table 2 Measurement results for workpiece attitude

No.	given value $(\theta, \varphi, \xi)/(^{\circ})$	normal vector	measured value $(\theta, \varphi, \xi)/(^{\circ})$
1	(2.0, 5.0, 20.0)	(0.0831, 0.0314, 0.9965)	(1.80, 4.76, 20.69)
3	(3.0, 4.0, 35.0)	(0.0687, 0.0491, 0.9964)	(2.82, 3.94, 35.55)
5	(5.0, 3.0, -60.0)	(-0.0442, 0.0742, 0.9960)	(4.26, 2.54, -59.22)

图8为工件在实验台上给定的姿态角及实际测量的姿态角及对应点的测量误差。从实验结果看,被测工件的姿态测量值与真实值基本相同,但存在一定误差,影响姿态测量结果的误差来源于摄像机与圆结构

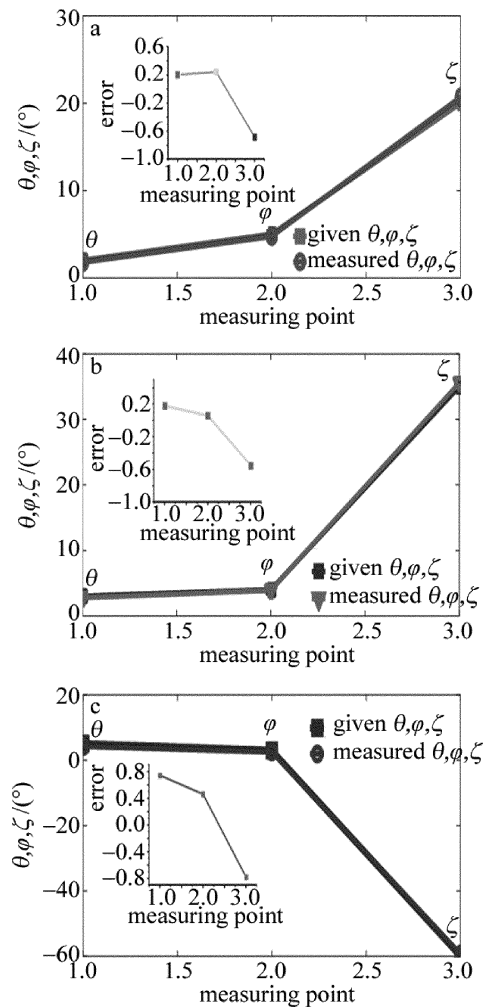


Fig. 8 The given attitude angle and the actual measurement angle  
a— $(\theta, \varphi, \xi) = (2.0, 5.0, 20.0)$  b— $(\theta, \varphi, \xi) = (3.0, 4.0, 35.0)$  c— $(\theta, \varphi, \xi) = (5.0, 3.0, -60.0)$

光投射器之间的支架误差、结构光光条中心亚像素坐标的提取误差等。

图9为工件位移测量原理。图中  $O$  为激光结构光几何中心,  $l_1, l_2$  分别为点  $O$  到参考点1所在边的相对位移。若参考点1不在  $y$  轴右侧,则测量点  $O$  到参考点2所在边的相对位移。

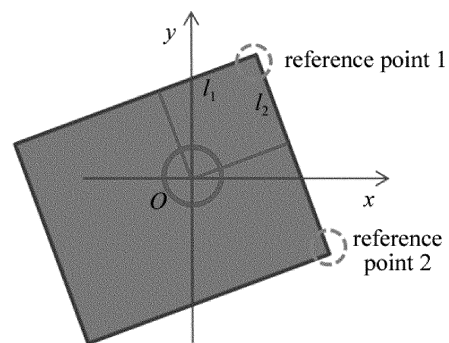


Fig. 9 Relative displacement measurement for workpiece

## 5 结 论

在实验室环境下搭建了六自由度姿态变换实验平台,为了建立姿态变换实验平台的机构模型及视觉系统模型,实现工件变姿态的视觉识别与测量,完成了如下主要工作:分析了机器人关节变换 D-H 建模原理基础上,构建了六自由度模拟平台的 D-H 运动学模型,导出了六自由度姿态变换平台的 D-H 参量表,并求出了实验平台基座到平台末端总的变换矩阵;应用小孔成像原理,建立了六自由度姿态变换平台视觉系统模型,为基于变换实验平台的工件姿态测量奠定了基础。

对激光环形光条图像进行在成像平面的数学表达式推导,得到了工件表面在摄像机坐标系中的法向量,通过坐标系之间的转换得到工件表面在世界坐标系中的法向量,进而推算出工件的姿态参量横滚角  $\theta$ 、俯仰角  $\varphi$  和及偏转角  $\zeta$ 。实验结果表明,3 个姿态角的测量值平均误差均小于  $1^\circ$ ,被测工件的姿态测量值与真实值基本相同。

### 参 考 文 献

- [1] HUANG Zh, LI Y W, GAO F. The expression of the orientation of a spatial moving unit by euler angle[J]. Journal of Yanshan University, 2002, 26(3):189-192(in Chinese).
- [2] JIANG Sh P, GUO Zh, SUN H D. Modeling and Simulation for caudal fin motion of dolphin robot[J]. Journal of Yanshan University, 2008, 32(4):311-315(in Chinese).
- [3] CHEN Zh K, XU A, WANG F B, *et al.* Pose measurement of target based on monocular vision and circle structured light[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(5):680-685(in Chinese).
- [4] YU Q F, SUN X Y, CHEN G J. A new method of measure the pitching and yaw of the axes symmetry object through the optical image[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000, 22(2):15-19(in Chinese).
- [5] LI H, YANG D H, ZHAI Ch. Research on the pose measurement of a 6-DOF platform using a single camera[J]. Optical Technique, 2010, 36(3):344-349(in Chinese).
- [6] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus; a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6):381-395.
- [7] LEPETIT V, MORENO-NOGUER F, FUA P. EPnP: An accurate  $O(n)$  solution to the PnP problem[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2):155-166.
- [8] STEWÉNIUS H, ENGELS C, NISTÉR D. Recent developments on direct relative orientation[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2006, 60(4):284-294.
- [9] LI G L, J Ch Y, GU B X, *et al.* Kinematics analysis and experiment of apple harvesting robot manipulator with multiple end-effectors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2016, 47(12):14-21(in Chinese).
- [10] QI J D, ZHANG D H, LI Sh, *et al.* Modeling and compensation of absolute positioning error of industrial robots[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2016, 44(11):113-118(in Chinese).
- [11] ZHANG X, ZHENG Z L, QI Y. Parameter identification and calibration of D-H model for 6-DOF serial robots [J]. Robot, 2016, 38(3):360-370(in Chinese).
- [12] MO Y. D-H modeling and simulation analysis based on six degree of freedom industrial robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(11):64-68(in Chinese).
- [13] YOUNG K Y, CHEN J J. Implementation of a variable D-H parameter model for robot calibration using an FCMAC learning algorithm [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 1999, 24(4):313-346.
- [14] CHALAK Q M R, SIAMAK P, ARASH R, *et al.* Kinematic analysis and workspace determination of hexarot-a novel 6-DOF parallel manipulator with a rotation-symmetric arm system [J]. Robotica, 2015, 33(8):1686-1703.
- [15] CAI C, SOMANI N, KNOLL A. Orthogonal image features for visual servoing of a 6-DOF manipulator with uncalibrated stereo cameras [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(2):452-461.
- [16] HSIEH H L, PAN S W. Development of a grating-based interferometer for six-degree-of-freedom displacement and angle measurements [J]. Optics Express, 2015, 23(3):2451-2465.
- [17] XU D, TAN M, LI Y. Visual measurement and control for robots [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2008: 39-118(in Chinese).
- [18] WANG F B, LIU J, LI Y Y, *et al.* The camera parameter calibration of excavator robot based on OpenCV[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2010, 29(6):1117-1120(in Chinese).
- [19] LI B, YUAN F B, LI F N, *et al.* Feature analysis of coaxial monitoring of welding pool and keyhole during laser deep penetration welding[J]. Laser Technology, 2017, 41(2):255-259(in Chinese).
- [20] YAN B, WANG B, LI Y. Optimal ellipse fitting method based on least-square principle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(3):295-298(in Chinese).