

一种获取物体3维信息的多轴机器人 激光扫描系统

李剑峰¹⁾ 汤青^{1),2)} 王鹏¹⁾ 朱建华¹⁾ 郭永康¹⁾

¹⁾(四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064) ²⁾(廊坊智通机器人技术有限公司, 廊坊 030001)

摘要 针对机器人工作范围有限引起扫描范围小的问题,建立了一种由机器人、便携式线激光3维扫描仪以及旋转平台构成的多轴激光扫描系统。利用半径已知的球体作为参照工具,机器人手持便携式扫描仪对球体进行扫描,精确标定了便携式扫描仪与机器人的方位关系。同时,提出了一种标定转台中心轴线的办法,该方法利用旋转平台上的参考球,在两个不同高度的旋转圆心精确标定出了转轴的方位。实验结果表明,该多轴激光扫描系统可以多角度、多方位对大尺寸物体进行扫描,并有着稳定、灵活以及精度高的特点。

关键词 计算机视觉 机器人视觉 3维激光扫描 TCP标定

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)04-0741-08

A New Multiple Robot Laser 3D Scanning System

LI Jian-feng¹⁾, TANG Qing^{1),2)}, WANG Peng¹⁾, ZHU Jian-hua¹⁾, GUO Yong-kang¹⁾

¹⁾(Institute of information Optics, College of Physical Sciences and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064)

²⁾(XinAoMDT Technology Co., Ltd, Langfang 065001)

Abstract To deal with the limitation of robot's working range, a multiple axes laser 3D scanning system is constructed by robot, a portable 3D laser scanner and turntable. Using a sphere with a known diameter as calibration tool, the pose of the portable scanner relative to the robot is calibrated accurately by scanning the sphere and computing the center position of the sphere. Meanwhile, a method is proposed to calibrate the pose of the turntable relative to the robot. In this approach, several rotational angles of turntable and two different height of the sphere are made to determine the rotational axis of turntable. Experiment results show that the multiple axes laser scanning system can measure the object of large scales from multiple angles and directions. Meanwhile, this system is robust flexible and of high measurement accuracy.

Keywords computer vision, robot vision, 3D laser scanning, TCP calibration

1 引言

结构光3维测量是获取物体表面3维信息的方法之一,由于其具有非接触、速度快、精度高等优点,现已被广泛地应用于机械制造、逆向工程、工业检测等行业^[1-3]。近年来,随着光学、微电子学与自动化学的发展,机器人和3维扫描仪配合扫描的技术也得到了发展,由于其具有灵活,可多角度、多方位扫

描以及可避免视觉死区等优点,目前已经在太空探测和机器人视觉方面得到了较好的应用^[4,5]。然而,在实际操作过程中,当目标物体的体积或长度超过机器人末端执行器的运动范围时,目标物体的某些部分就无法被扫描到,因此还需要加一个附加的旋转平台,通过旋转平台和机器人末端执行器的配合运动,使整个目标物体都能被便携式3维激光扫描仪扫描到。因此,精确标定扫描仪坐标系与机器人末端执行器坐标系间的关系(一般称为扫描仪工

具中心点(tool center point, TCP)标定)以及标定旋转平台中心轴线是利用该系统进行 3 维测量的前提。在传统的 TCP 标定中^[6-8],通常使机器人执行器末端工具中心点从不同的方向接触一个已知空间位置的参考点来获得工具 TCP 与机器人末端执行器坐标系间的关系。但是,这个过程要求人为判断工具中心点是否与参考点重合,其精度取决于操作者。而且对于线激光扫描仪,要判断激光线上一点与参考点是否重合是很难的,因此,必须找到一种新的扫描仪 TCP 标定方法。同时,转台轴线的标定是扫描数据拼合的基准,文献[9]提出了用标准圆柱标定转台中心的方法,但是未考虑转台转轴的倾斜对测量数据的影响。文献[10]提出了求扫描球球心所在平面法向来标定转轴的方法。但是,该方法用很少的点求平面的法向的方法误差较大,不能满足精确标定的要求。

本文针对上述的几点问题,建立了一种由机器人,便携式线激光 3 维扫描仪以及旋转平台构成的多轴激光 3 维扫描系统。利用半径已知的球体作为标定工具,采用了一种便携式 3 维扫描仪 TCP 标定的新方法,该方法将小球固定在机器人附近,利用机器人夹持便携式扫描仪扫描球体并拟合球心,确定了便携式 3 维扫描仪 TCP。同时,提出了一种标定转台中心转轴线的方法,该方法将一个半径已知的球体固定在转台中间,通过旋转测量不同位置的球,拟合不同位置的球心并计算球心所在圆的圆心,然后改变小球高低位置,用相同的方法计算得到另一个圆心,由这两个圆心便可精确标定出转轴的方位。这样便携式 3 维扫描仪 TCP 以及转台中心轴线都得到了精确标定。因此,可以利用该系统从多角度、多方位对物体进行 3 维测量。

2 系统模型与标定

多轴 3 维激光扫描系统是由机器人,便携式 3 维扫描仪以及旋转平台 3 部分构成,如图 1 所示,称机器人底座的坐标系为机器人基坐标系,称机器人末端执行器坐标系为 Tool₀ 坐标系,便携式 3 维扫描仪被固定在机器人末端执行器上,旋转平台安装在机器人工作范围内,通过这几部分的配合便可多角度、多方位的获得目标物体的 3 维信息。因此,标定这几部分之间的位姿关系是首先要解决的问题,标定过程分为以下几部分:

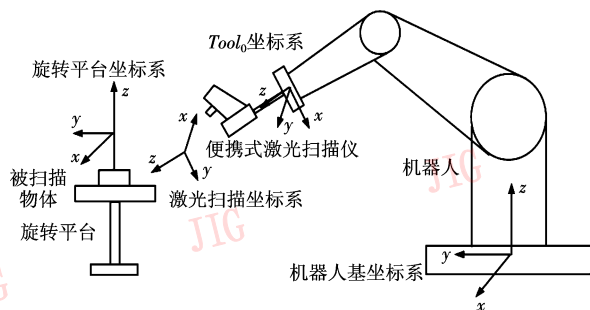


图 1 多轴 3 维扫描系统示意图

Fig. 1 Schematic structure of the multiple axes laser scanning system

- (1) 便携式 3 维扫描仪摄像机参数与激光平面参数的标定。
- (2) 便携式 3 维扫描仪的 TCP 的标定。
- (3) 旋转平台的旋转中心轴的标定。

2.1 便携式 3 维扫描仪摄像机参数和激光平面的标定

2.1.1 摄像机模型

图 2 为便携式 3 维扫描仪的摄像机模型的几何结构,它反映了任意空间点与图像点的投影变换关系。设 (X_w, Y_w, Z_w) 为点 P 在空间坐标系 $\{W\}$ 中 3 维坐标, (X_c, Y_c, Z_c) 是该点在摄像机坐标系 $\{C\}$ 中的 3 维坐标。 (X_R, Y_R) 是点 P 在中心为 O_R 的图像物理坐标系 $\{R\}$ 中的理想坐标,单位是 mm。 (X_I, Y_I) 是点 P 在中心为 O_I 的理想图像像素坐标系 $\{I\}$ 中的坐标,单位是像素数 (pixel)。 (\hat{X}_I, \hat{Y}_I) 为点 P 在考虑透镜径向畸变时图像像素坐标系中的实际坐标。

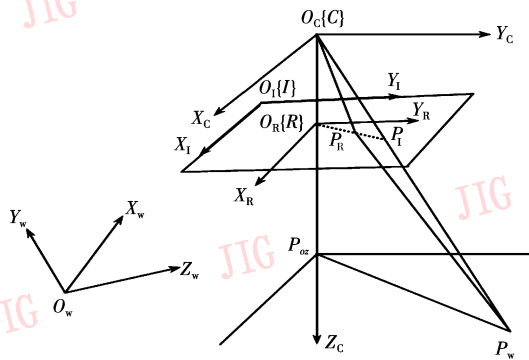


图 2 摄像机变换模型

Fig. 2 Camera transformation model

2.1.2 3 维空间坐标到计算机图像坐标的变换过程

将物体点的 3 维坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 变换到图像

平面坐标 (X_1, Y_1) 需进行 4 个步骤来完成:

(1) 摄像机坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 到物空间坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 的变换

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R}_w \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T}_w \quad (1)$$

式中, $\mathbf{R}_w = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$ 为旋转矩阵, $\mathbf{T}_w = [t_x \quad t_y \quad t_z]^T$ 为平移矢量。

(2) 小孔模型下的摄像机坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 到图像物理坐标 (X_R, Y_R) 的变换

$$X_R = \frac{f \cdot X_c}{Z_c}, Y_R = \frac{f \cdot Y_c}{Z_c} \quad (2)$$

式中, f 为透镜的焦距。

(3) 图像物理坐标 (X_R, Y_R) 到理想图像像素坐标 (X_1, Y_1) 的变换

设 (x_0, y_0) 为图像物理坐标系 $\{R\}$ 的原点 O_R 在图像像素坐标系 (X_1, Y_1) 中的坐标, 每一个像素在 u 轴与 v 轴方向上的物理尺寸分别为 D_u 和 D_v , 则有

$$\begin{cases} X_1 = X_R/D_u + x_0 = \frac{f_x \cdot X_c}{Z_c} + x_0 \\ Y_1 = Y_R/D_v + y_0 = \frac{f_y \cdot Y_c}{Z_c} + y_0 \end{cases} \quad (3)$$

这里, f_x 和 f_y 定义如下:

$$f_x = f/D_u, f_y = f/D_v \quad (4)$$

(4) 理想图像像素坐标 (X_1, Y_1) 到物空间坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 的变换

将式(1)代入式(3), 可以推出计算图像坐标系 (X_1, Y_1) 和空间坐标系 (X_w, Y_w, Z_w) 的关系如下:

$$\begin{cases} X_1 = f_x \frac{r_{11}X_w + r_{12}Y_w + r_{13}Z_w + t_x}{r_{31}X_w + r_{32}Y_w + r_{33}Z_w + t_z} + x_0 \\ Y_1 = f_y \frac{r_{21}X_w + r_{22}Y_w + r_{23}Z_w + t_y}{r_{31}X_w + r_{32}Y_w + r_{33}Z_w + t_z} + y_0 \end{cases} \quad (5)$$

将上式通分, 可以化简为

$$\begin{cases} X_1 = \frac{L_1X_w + L_2Y_w + L_3Z_w + L_4}{L_9X_w + L_{10}Y_w + L_{11}Z_w + L_{12}} \\ Y_1 = \frac{L_5X_w + L_6Y_w + L_7Z_w + L_8}{L_9X_w + L_{10}Y_w + L_{11}Z_w + L_{12}} \end{cases} \quad (6)$$

2.1.3 摄像机内外参数和激光平面参数的求解

如果已知 n 个点 ($n > 11$) 的空间坐标 (X_n^w, Y_n^w, Z_n^w) 以及与之相对应的图像坐标 (X_n^1, Y_n^1) , 使用

式(6), 用最小二乘法求出上述线性方程组的解。在计算中 L_{12} 常取为 1, 从以上的解 11 个参数 $(L_1, L_2, \dots, L_{11})$, 可以进一步计算出摄像机所有的外部参数(旋转矩阵 \mathbf{R}_w 和平移矢量 \mathbf{T}_w), 和内部参数 f_x, f_y 和 (x_0, y_0) ^[11]。但是, 实际的镜头有像差, 因此, 在线性模型得出的解是不精确的, 必须用考虑像差的模型代替, 描述非线性畸变可由下列公式表示

$$\begin{cases} \hat{X}_1 = X_1 + \delta_x(X_1, Y_1) \\ \hat{Y}_1 = Y_1 + \delta_y(X_1, Y_1) \end{cases} \quad (7)$$

这里 X_1 和 Y_1 是不考虑像差时的理想图像像素坐标, \hat{X}_1 和 \hat{Y}_1 是考虑像差后其对应的图像像素坐标。 δ_x 和 δ_y 是非线性畸变值, 可以由下式表示

$$\begin{cases} \delta_x(X_1, Y_1) = k_1X'r + k_2X'r^2 + k_3X'r^3 + p_1(2X'^2 + r) + p_2(2X'Y') \\ \delta_y(X_1, Y_1) = k_1Y'r + k_2Y'r^2 + k_3Y'r^3 + p_1(2X'Y) + p_2(2Y'^2 + r) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $X' = X_1 - x_0, Y' = Y_1 - y_0, r = X'^2 + Y'^2, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2$ 称为非线性畸变参数。定义误差函数 F 为

$$\begin{cases} F_{x,n} = \hat{X}_n^1 - \frac{L_1X_n^w + L_2Y_n^w + L_3Z_n^w + L_4}{L_9X_n^w + L_{10}Y_n^w + L_{11}Z_n^w + 1} \\ F_{y,n} = \hat{Y}_n^1 - \frac{L_5X_n^w + L_6Y_n^w + L_7Z_n^w + L_8}{L_9X_n^w + L_{10}Y_n^w + L_{11}Z_n^w + 1} \end{cases} \quad (9)$$

所以可通过选择在 F 中列出的内外部参数使下式的平方和误差取最小值:

$$F(\mathbf{R}_w, \mathbf{T}_w, x_0, y_0, f_x, f_y, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2) = \sum_{n=1}^m (F_{x,n}^2 + F_{y,n}^2) \quad (10)$$

式中, m 是用于标定的像点数。利用前面无像差模型计算出的 $(L_1, L_2, \dots, L_{11})$ 作为初始条件, 便可以用任何一种非线性最小二乘法^[12] 计算出 $(L_1, L_2, \dots, L_{11})$ 和畸变参数 k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 的精确解。在标定完摄像机后, 再进行激光平面参数标定, 激光平面可以由下式描述:

$$aX_n^w + bY_n^w + cZ_n^w + d = 0 \quad (11)$$

用非线性最小二乘法对空间坐标 (X_n^w, Y_n^w, Z_n^w) 进行平面拟合, 便可以计算出平面系数 a, b, c, d 。

2.2 便携式 3 维扫描仪 TCP 标定

为了利用机器人持便携式 3 维扫描仪获取物体的 3 维信息, 首先要标定扫描仪坐标系(即摄像机模型中的空间坐标系)相对于机器人末端执行器坐标系 Tool_0 的关系, 把这个过程叫作 3 维扫描仪的 TCP 标定。采用了一种几何约束的方法来标定扫描仪的 TCP, 标定过程如下:

将一个半径已知的球固定在机器人附近,机器人夹持扫描仪对球进行扫描,被扫描到的球面上的点在机器人基坐标系下的坐标 (X_B, Y_B, Z_B) 与其相对于扫描仪坐标系的坐标 (X_1, Y_1, Z_1) 间的关系满足:

$$\begin{pmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{matrix} \text{Tool}_0 \\ \text{scanner} \end{matrix} \mathbf{T} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中, \mathbf{M} 为机器人末端执行器坐标系 Tool_0 与机器人基坐标系的旋转平移变换关系,可以从机器人控制器读出。 $\begin{matrix} \text{Tool}_0 \\ \text{scanner} \end{matrix} \mathbf{T}$ 是所要标定的扫描仪坐标系和机器人末端执行器坐标系 Tool_0 间的坐标变换矩阵

$\begin{pmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{t}_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, 它又可以用欧拉角函数表示:

$$\begin{pmatrix} \cos\theta/\cos\phi & \sin\theta/\cos\phi & -\sin\theta & x \\ -\sin\theta/\cos\phi + \cos\theta/\sin\theta\sin\phi & \cos\theta/\cos\phi + \sin\theta/\sin\theta\sin\phi & \cos\theta\sin\phi & y \\ \sin\theta/\sin\phi + \cos\theta/\sin\theta\cos\phi & -\cos\theta/\sin\phi + \sin\theta/\sin\theta\cos\phi & \cos\theta\cos\phi & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

对于固定在机器人附近的球来说,其相对于机器人基坐标系的坐标 (X_B, Y_B, Z_B) 应满足方程:

$$(X_B - X_0)^2 + (Y_B - Y_0)^2 + (Z_B - Z_0)^2 = r_s^2 \quad (13)$$

式中, (X_0, Y_0, Z_0) 为球心在机器人基坐标系下的坐标, r_s 为球的半径(已知)。将式(12)代入式(13),将得到一个包含 9 个参数 $(x, y, z, \theta, \phi, \psi, X_0, Y_0, Z_0)$ 的方程。在扫描仪扫描到球的不同部位时,将得到 (X_1, Y_1, Z_1) 及 \mathbf{M} 序列,将其带入式(12)和式(13),可得到一个非线性方程组。如果设误差函数

$$E = \sum ((X_B - X_0)^2 + (Y_B - Y_0)^2 + (Z_B - Z_0)^2 - r_s^2)^2 \quad (14)$$

方程组求解问题就可以转换为求在 E 取最小值时 $(x, y, z, \theta, \phi, \psi, X_0, Y_0, Z_0)$ 的解。使用非线性最小二乘法对方程组求解便可以得到这 9 个参数的精确解。

2.3 旋转平台中心轴线的标定

由于安装误差,转台中心轴线与机器人基坐标系的 z 方向难以一致,因此,必须确定旋转平台在机器人基坐标系下的旋转中心及中心轴线,然后以旋转中心为原点,以中心轴线为 z 轴建立转台坐标系,可称这个过程为旋转平台的中心轴线的标定,标定过程如图 3 所示。

首先,将半径已知的球固定在转台中间位置附近,机器人持扫描仪扫描该球便可以得到球在扫描仪坐标系下的坐标 (X_1, Y_1, Z_1) 。通过式(4),将 $(X_1,$

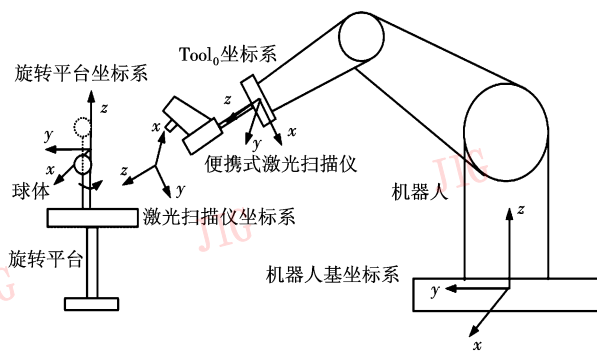


图 3 转台旋转中心轴线的标定结构

Fig.3 Calibration structure of the rotational axis of turntable

$Y_1, Z_1)$ 变换到机器人基坐标系下的坐标 (X_B, Y_B, Z_B) 。由于球相对于机器人基坐标系是固定的,拟合球便可以得到球心在机器人基坐标系下的位置。然后旋转转台到不同角度,并对球进行扫描,这样就能得到不同角度下球心的位置。这些球心位置围绕旋转轴形成一个圆,拟合圆便可以得到圆心的位置。接着将球的位置升高或者降低,再次执行同样的操作,就又能得到一个圆心的位置。这两个圆心的连线决定转台的中心旋转轴的方向。以两个圆心中的任一点作为原点,转台的中心旋转轴为 z 轴,并利用正交关系设定 x 轴和 y 轴,就能确定出转台的坐标系并得到它和机器人基坐标系的变换关系 $\begin{matrix} \text{Base} \\ \text{Rotation} \end{matrix} \mathbf{T}$ 。

3 目标物体的扫描与 3 维重建

在完成了扫描仪的 TCP 标定和转台的中心轴线标定工作以后,就可以利用这些参数完成目标物体的扫描与 3 维重建工作。其基本原理简述如下:

- (1) 机器人持扫描仪扫描目标物体,得到在扫描仪坐标系下的坐标为 $\mathbf{V}_{\text{LaserCoor}}$ 。
- (2) 扫描仪坐标系相对于机器人 Tool_0 坐标系的变换矩阵为 $\begin{matrix} \text{Tool}_0 \\ \text{scanner} \end{matrix} \mathbf{T}$, 这个变换矩阵可以通过扫描仪的 TCP 标定确定。
- (3) \mathbf{M} 为机器人末端执行器与机器人基坐标系的变换矩阵,可以直接从机器人的控制器中实时读取。
- (4) 旋转转台坐标系相对于机器人基坐标系的变换矩阵为 $\begin{matrix} \text{Base} \\ \text{Rotation} \end{matrix} \mathbf{T}$, 这个变换矩阵可以通过转台中心轴线标定来得到。
- (5) 目标物体相对于旋转转台坐标系的变换为 $\begin{matrix} \text{Rotation} \\ \text{Workobject} \end{matrix} \mathbf{T}$, 这个坐标是由转台坐标系绕 z 轴旋转一定角度而得到的,由于在扫描过程中知道转台旋转的

角度, $T_{Workobject}^{Rotation}$ 可以表示为

$$T_{Workobject}^{Rotation} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

(6) 目标物体在机器人基坐标系坐标下的坐标为 $V_{RestoreCoor}$, 这个坐标是最终所恢复出来物体的 3 维坐标。

基于以上关系, 可以恢复出目标物体在机器人基坐标系下的坐标为

$$V_{RestoreCoor} = \begin{matrix} Base \\ Rotation \end{matrix} T \cdot \begin{matrix} Rotation \\ Workobject \end{matrix} T \cdot \begin{matrix} Base \\ Rotation \end{matrix} T^{-1} \cdot M \cdot \begin{matrix} Tool_0 \\ Scanner \end{matrix} T \cdot V_{LaserCoor} \quad (15)$$

4 实验过程和结果

实验采用美国 ABB 公司六自由度 IRB4400 机器人, 便携式 3 维扫描仪(主要参数: CCD 像素 1280×1024 , 镜头焦距为 16mm, 半导体激光二极管功率 10mw, 景深为 24mm) 被固定在机器人末端执行器上, 标准球的半径为 15.38cm, 旋转平台固定在机器人的工作范围内, 由步进电机控制其旋转。如图 4 所示。

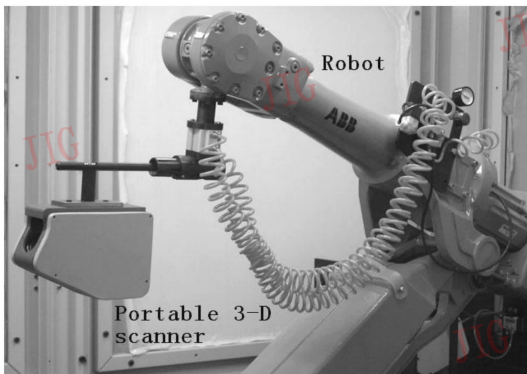


图 4 机器人 IRB 4400 持便携式扫描仪的照片
Fig. 4 Photograph of a portable laser scanner head on an industrial IRB 4400

4.1 激光扫描仪参数标定

如图 5 所示, 标定块被固定在电动位移台上, 通过控制电动位移台水平移动标定块。空间坐标系的原点位于标定块在电动位移台零刻度时左上角第一个标定孔的中心, X 轴沿标定孔的横方向, Y 轴沿标定孔的纵方向, Z 轴沿标定块移动的方向, 邻标定孔的距离为 4mm。可以得到标定孔在空间坐标系中的坐标 (X_n^w, Y_n^w, Z_n^w) 。便携式 3 维扫描仪水平放置。移动标定块并采集图片, 如图 6 所示, 通过对图

像的二值化和找重心点的处理, 可以探测到所有标定孔重心在图像中的坐标, 如图 7 所示。实验中采集了 5 幅标定块图片, 共得到了 245 个标定点的空间坐标 (X_n^w, Y_n^w, Z_n^w) 和与之相对应的理想图像像素坐标 (X_n^l, Y_n^l) 。

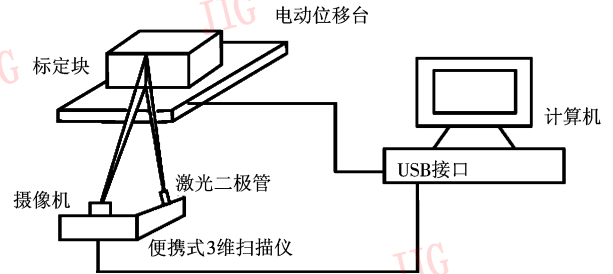


图 5 便携式 3 维扫描仪标定结构示意图
Fig. 5 Schematic calibration structure of portable laser scanner

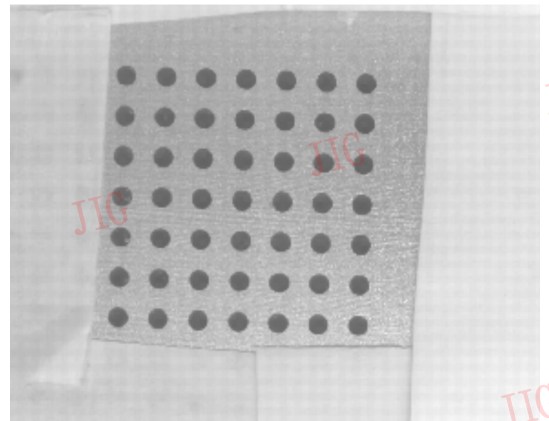


图 6 采集的标定块图片
Fig. 6 Picture of calibration object



图 7 标定孔图像坐标探测过程
Fig. 7 Detection process of image coordinates of calibration holes

利用式(6)可以求得 11 个参数 L_1, L_2, \dots, L_{11} 的初值, 利用式(10)迭代求解便得到了 11 个参数 L_1, L_2, \dots, L_{11} 和畸变参数 k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 的精确解。同时, 通过探测激光线在图像上的位置, 每条激光线可以得到 120 个图像点坐标 (X'_n, Y'_n) 以及它们的空间坐标 Z_n^w , 将所得 (X'_n, Y'_n) 代入式(6), 可以计算出考虑像差后的图像像素坐标 (\hat{X}'_n, \hat{Y}'_n) , 将参数 $(L_1, L_2, \dots, L_{11}, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2)$ 代入式(7), 就可以得出测量点的空间坐标 (X_n^w, Y_n^w, Z_n^w) , 拟合激光平面, 可计算出激光平面的参数。标定结果如下:

$$f_x = 3\,293.8, f_y = 3\,291.5, x_0 = 615.11, y_0 = 522.84$$

$$R_w = \begin{bmatrix} -0.9998 & 0.0124 & -0.0128 \\ -0.0112 & -0.9996 & -0.0265 \\ 0.0132 & 0.02630 & -0.9996 \end{bmatrix}$$

$$T_w = [10.3642 \quad 9.2040 \quad 131.957]^T$$

$$(k_1, k_2, k_3, p_1, p_2) = (0.0000003, 0, 0, -0.0000011, 0.0000015)$$

$$[a, b, c, d] = [0.9398, 0.0044, 0.3416, 4.1925]$$

在理想情况下, 测量点到激光平面的距离 d_n 为零, 所以把 d_n 看成 X_w 和 Y_w 的测量误差。将图像坐标 (\hat{X}'_n, \hat{Y}'_n) , 16 个参数 $(L_1, L_2, \dots, L_{11}, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2)$ 和激光平面参数 $[a, b, c, d]$ 代入式(7)和式(9), 可以得到激光线上测量点的空间坐标 (X_n^w, Y_n^w, Z_n^w) , 将 Z_n^w 与标准的 Z_n^w 比较, 得出了 Z_w 的测量误差 d_z 。图 8 给出了空间坐标 X_w, Y_w 的标准偏差 d_n 及空间坐标 Z_w 的标准偏差 d_z 与图像像素坐标的关系。从图 8 可以看出, d_n 和 d_z 都小于 0.035mm, 满足精确测量的要求。

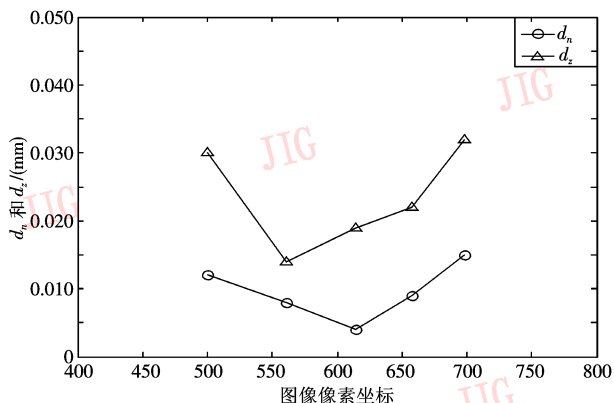


图 8 标准偏差 d_n 及 d_z 和图像像素坐标的关系

Fig. 8 Dependence of standard deviation d_n and d_z on computed image coordinates

4.2 扫描仪的 TCP 标定实验

使用一个已知半径的小球 ($r = 15.38\text{cm}$) 为参

照工具, 机器人夹持扫描仪运动至固定在空间中的一个球体附近, 使得该球体在扫描仪的可视范围内, 控制机器人扫描球。在扫描过程中, 记录下被扫描点在扫描仪下的坐标以及对应的 M 。利用扫描数据, 通过非线性最小二乘法求解式(14)便可求得扫描仪坐标系与机器人末端坐标系 $Tool_0$ 间的旋转平移关系。实验中求出

$${}_{Tool_0}^{Scanner} T = \begin{bmatrix} -0.0070 & -0.9998 & 0.0030 & 527.215 \\ 0.1476 & -0.0040 & -0.9890 & 11.762 \\ 0.9890 & -0.0064 & 0.1477 & 420.643 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

为了检验标定误差, 把扫描仪坐标系下的扫描数据通过求出的变换矩阵 ${}_{Tool_0}^{Scanner} T$ 转换到机器人基坐标系下, 然后拟合球。把拟合球的误差作为扫描仪的 TCP 标定误差: $\delta = 0.06\text{mm}$ 。

4.3 旋转平台中心标定实验

将一个已知半径的小球 ($r = 15.38\text{cm}$) 固定在旋转平台中间, 机器人夹持扫描仪扫描球得到球在扫描仪坐标系下数据。将 ${}_{Tool_0}^{Scanner} T$ 和扫描数据代入式(15), 便可得到被扫描点在机器人基坐标系下的坐标, 拟合球求得球心在机器人基坐标系下的坐标。通过数控系统控制转台旋转, 可得到多个位置时小球球心在机器人基坐标系下的坐标, 拟合圆得到圆心坐标 $(256.478, 1532.271, 694.253)$ 。然后将小球升高, 重复前面的过程得到另一个圆心坐标为 $(249.342, 1516.531, 795.452)$ 。以第 1 个圆心坐标为坐标系原点, 两圆心连线的向量为 z 轴, 任意设定另外两个坐标系的方向, 使其满足右手定律, 就能建立旋转平台的坐标系并得出此坐标系和机器人基坐标系的变换关系 ${}_{Rotation}^{Base} T$ 。实验中得到

$${}_{Rotation}^{Base} T = \begin{bmatrix} 0.6982 & -0.7125 & -0.0695 & 256.478 \\ 0.6982 & 0.6993 & -0.1533 & 1532.271 \\ 0.1578 & 0.0585 & 0.9857 & 694.253 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

为了检验该多轴扫描系统的测量误差, 每转动旋转平台 120° 就得到一组扫描仪坐标系下的扫描数据 $V_{LaserCoor}$, 记录下对应的 M 。把 $V_{LaserCoor}, M, {}_{Tool_0}^{Scanner} T$ 和 ${}_{Rotation}^{Base} T$ 代入式(15)得到了被扫描点在机器人基坐标系下的坐标 $V_{RestoreCoor}$, 其点云如图 9 所示。利用 $V_{RestoreCoor}$ 拟合球并把拟合球的标准偏差作为该多轴扫描系统的测量误差: $d_{system} = 0.15\text{mm}$ 。此偏差包含了摄像机和激光平面标定误差, 3 维扫描仪的 TCP 标定误差, 旋转平台的中心旋转轴的标定误差以及机器

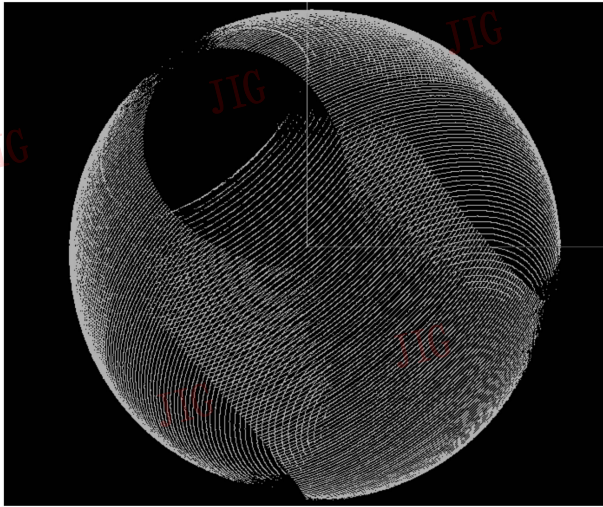


图9 机器人基坐标系下被扫描球的点云
Fig.9 Scanning point cloud of the sphere in robotbase coordinate system

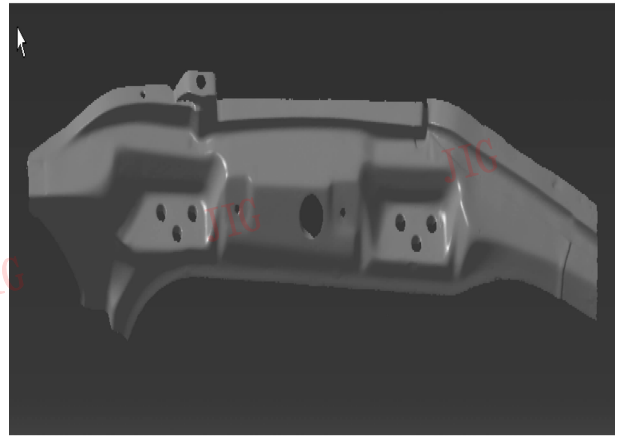


图11 3维重建面形结果
Fig.11 3D reconstructed surface

人本身的定位误差。如果对形状一定物体进行扫描并且确定了机器人的扫描路径,则可以对机器人本身的定位误差进行预补偿,从而进一步提高测量精度。

4.4 目标物体3维测量

利用以上的标定结果,从扫描仪坐标系下得到的目标物体表面的3维信息可以变换到机器人基坐标系下。目标物体相对机器人基坐标系是固定的,因此可以获得完整的目标物体面形的3维信息。实验中对长大约为150cm,宽30cm的模具进行了扫描,该模具已经超过机器人工作范围,机器人无法直接对其扫描,而利用多轴扫描系统对其扫描,获得了较好的结果。扫描的点云和3维重建面形结果的照片如图10和图11所示。

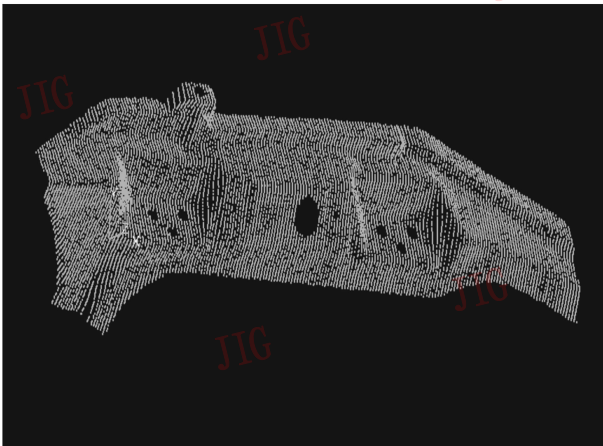


图10 扫描模具的点云
Fig.10 Scanning point cloud of the object

5 结论

本文建立了一种由机器人,便携式线激光3维扫描仪以及旋转平台构成的多轴激光3维扫描系统,解决了由于机器人工作范围有限引起的扫描范围小的问题。用半径已知的球体作为标定工具,使用了一种扫描球标定便携式3维扫描仪TCP的方法,同时提出了一种标定旋转平台中心转轴的方法。该方法利用旋转平台上的参考球在两个不同高度的旋转圆心精确标定出了转轴的方位。使用该多轴激光扫描系统可以从多角度、多方位对物体进行3维测量并扩大了扫描范围,实验结果表明,该系统有着稳定,灵活的特点,测量精度高的特点,有很好的市场应用前景。

参考文献 (References)

- 1 Jin Gang, Li De-hua, Li Ze-yu. Acquiring depth information of object's low reflectance surface in three dimensional laser color scanner[J]. Journal of Image and Graphics, 1999, 4(5): 383 ~ 386. [金刚, 李德华, 李泽宇. 3维激光彩色扫描仪中获取物体表面弱反射区深度信息的方法[J]. 中国图象图形学报, 1999, 4(5): 383 ~ 386.]
- 2 Liu Zhen-ya, He Ping-an, Wang Wei-ping. Section area measuring of irregular stack with light-section method [J]. Optical Technique, 2005, 31(1): 146 ~ 148. [刘震亚, 何平安, 王卫平等. 激光光切法测量不规则堆料的截面面积[J]. 光学技术, 2005, 31(1): 146 ~ 148.]
- 3 Onuh S, Bennett N, Baker J. Rapid prototyping: practical approach to enabling reverse engineering[A]. Proceedings of the SPIE on International Society for Optical Engineering [C], Newton, US,

- 2001, **4566**: 145 ~ 151.
- 4 Laurin D, Blais F, Beraldin J A, Cournoyer L. An eye-safe imaging and tracking laser scanner system for space application[A]. In: Proceedings of SPIE, Laser Radar Technology Gary W. Kamerman, US, 1996, **2748**: 168 ~ 177.
 - 5 Lionis G S, Kyriakopoulos K J. A laser scanner based mobile robot SLAM algorithm with improved convergence properties[A]. In: Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C], Lausanne, Switzerland, 2002, **1**: 582 ~ 587.
 - 6 Schreoder K. Handbook of Industrial Robots[M]. John Wiley & Sons Inc, 1999: 795 ~ 810.
 - 7 Kyle S A, Meyer R, van Albada G D. Robot calibration by optical methods[A]. In: Proceedings of IEE Colloquium on Next Steps for Industrial Robotics[C], London, UK, 1994.
 - 8 Kyle S A. Optical methods for calibrating and inspecting robots[J]. Computing & Control Engineering Journal, 1995, **6**(4): 166 ~ 173.
 - 9 Zhou Hui-cheng, Chen Ji-hong, Yang Dao-shan. Structure and principle of a novel 3D laser probe[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2000, **14**(2): 21 ~ 25. [周会成, 陈洁红, 阳道善. 一种新型三维视觉测头的结构与原理[J]. 电子测量与仪器, 2000, **14**(2): 21 ~ 25.]
 - 10 Xu Yong-an, Yang Qin, Huai Jin-peng. Calibration of the axis of the turntable in 4-axis laser measuring system and registration of multi-view[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, **32**(5): 659 ~ 662. [徐永安, 杨钦, 怀进鹏. 激光旋转扫描测量系统中转轴标定及多视拼合[J]. 中国激光, 2005, **32**(5): 659 ~ 662.]
 - 11 Ma Song-de, Zhang Zheng-you. Computer vision[M]. Beijing: Scientific Press, 1998. [马颂德, 张正友. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 1998.]
 - 12 Zhou Tie. Computing method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 196 ~ 197. [周铁. 计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 196 ~ 197.]