

文章编号: 0258-7025(2005)05-0659-04

激光旋转扫描测量系统中转轴标定及多视拼合

徐永安, 杨 钦, 怀进鹏

(北京航空航天大学计算机学院, 北京 100083)

摘要 由于激光扫描一次只能测量给定视角可见的物体表面,若测量物体全方位的形状,必须通过旋转,从多个视角测量物体,并将多视数据拼合于同一坐标系。精确标定转台的中心轴线是旋转测量和多视拼合的关键。提出了一种标定转台中心轴线的新技术,该方法将一个标定球固定于转台上,通过旋转,测量不同位置的标定球,计算不同位置的球心及其所在平面的法矢,再利用几何变换计算球心所在圆的圆心,从而精确标定出转轴的方位,实现了多视测量数据在线自动拼合,提高了数据拼合的精度。对于精度为 $50\ \mu\text{m}$ 的测量机,在半径 $80\ \text{mm}$ 的旋转范围内,拼合误差约为 $70\ \mu\text{m}$ 。与以前的方法相比,设计的转轴标定方法简单、高效,在其他安装转台的测量系统中同样适用。

关键词 测量; 标定; 多视; 拼合

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

Calibration of the Axis of the Turntable in 4-Axis Laser Measuring System and Registration of Multi-View

XU Yong-an, YANG Qin, HUAI Jin-peng

(School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract Since laser scanner only samples the surface of an object which is visible from a given viewpoint, in order to scan the entire object, it is necessary that the multiple views around the object are captured and aligned in a common coordinate system. Locating the center axis of a turntable precisely is essential for measuring the object which turned on the axis and the registration of multi-view. A new method is proposed to calibrate the axis of the turntable. Firstly, a ball as the calibration normal is mounted on the turntable, then measuring the surface of the calibration ball and calculating its center at different rotational angles. These centers define a circle and a plane. The normal of the plane and the center of the circle counted by geometric transform decide the orientation of the axis of the turntable. The multiple views turn around the axis and can be integrated automatically. The error of registration is about $70\ \mu\text{m}$ within $80\ \text{mm}$ rotational radius on the measuring platform which accuracy is $50\ \mu\text{m}$. Compared with the previous methods, the new method is simple and efficient and can be used in other measuring system with a turntable.

Key words measurement; calibration; multi-view; registration

1 引 言

三维表面形状数字化是数字化设计与制造的重要环节。光学测量具有非接触、速度快、易于自动化等特点,是当今三维表面形状数字化技术之一。作为光学测量方法,激光扫描测量在实际测量过程中由于光线被遮挡的原因,往往需要多次不同方位的测量才能获得全方位外表面的数据片,其中每个方位测量的数据片称为视,所有不同方位测量的数据片组合成完整的被测物体外表面的过程称为多视拼合。

多视拼合直接影响物体整体测量精度,目前常用的方法有两类:一类是附加标记物^[1],在被测物体粘贴标记或定位球,通过两片数据点云对应的三个不共线点的匹配,实现数据的拼合;另一类是利用数据点云进行匹配^[2~9],如 ICP(Interactive closest point)算法^[7]等。前一类方法受标记提取精度和测量精度的影响,需要在一定误差范围内匹配拼合数据之间对应的点对。后一类方法需要交互操作将数据点云粗拼合,然后再在数据片之间进行迭代运算,多片数据之间的拼

收稿日期: 2004-03-29; 收到修改稿日期: 2004-06-14

作者简介: 徐永安(1965—),男,江苏兴化人,高级工程师,博士后,主要从事计算机图形学、计算机辅助设计、计算机图像处理与视觉测量、逆向工程研究。E-mail: xuyongan@hotmail.com

合需要有合理的次序,以避免误差累积^[4,8]。不论采用哪种方法,由于测量过程中存在误差,多个视角测量数据片很难实现无缝拼合,且整体拼合精度低于单片测量精度。进一步改进硬件设计,提高多视拼合精度和效率很有必要。本文设计了一种标定转台中心轴线的新技术,可以精确标定出转轴的方法,实现多视测量数据在线自动拼合。

2 四轴激光扫描测量系统

如图1所示,在XYZ相互垂直的三轴测量体系中安装数控转台,成为四轴激光扫描测量系统。在四轴测量系统中有两种测量方式,一种是边测量边旋转,被测物体旋转360°就能够测量全部外表面形状,这种方法适合测量回转体或近似回转体;另一种方法是一次测量全部朝向光线的外表面,然后再转到下一个需要测量的方位,全部外表面从几个方位就可以测量完毕。在四轴测量系统中,数控转台可以获得被测物体的旋转角度,测量的数据点绕转台中心轴线可以自动拼合,其拼合精度取决于转台中心轴线的精确标定。

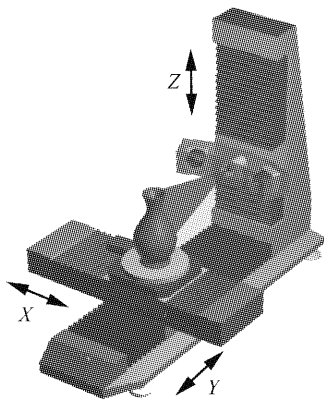


图1 四轴激光扫描测量机模型
Fig. 1 Model of 4-axis laser scanner

3 转台中心轴线的标定

转台中心轴线标定是旋转测量的关键。如图2所示,由于安装误差,转台中心轴线R与平行于Z轴的Z'方向难以一致,若不同角度的测量数据点绕Z'旋转会产生间隙。

为精确标定转台中心轴线,提出如下方案:在图2转台上固定一个标定球,通过数控系统控制转台旋转,控制球的球心绕转轴R形成一个圆,该圆的圆心O'是R上的点,该圆所在平面的法矢即为R的方向。

基于该思路,在XYZ三轴测量系统中测量并

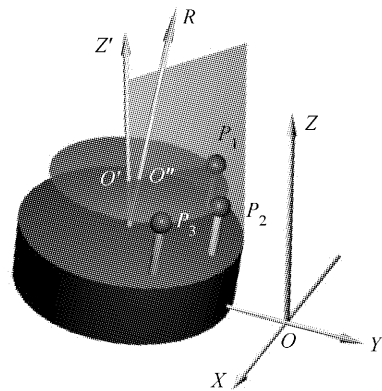


图2 转台中心轴线的标定原理图
Fig. 2 Frame of calibrating the turntable's axis

计算标定球三个不同位置的球心 $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$, $P_3(x_3, y_3, z_3)$, P_1, P_2, P_3 所在平面的法矢N即为转台中心轴线的方向

$$N = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \end{vmatrix}$$

有了转台中心轴线的方向N,还需要确定空间三点 P_1, P_2, P_3 所在圆的圆心 $O'(x_0, y_0, z_0)$ 才能使转台中心轴线定位。如图3,为了求 O' ,首先计算转轴R在XOY面上的投影与Y轴夹角 α ,R与Z轴的夹角 β ,然后 P_1, P_2, P_3 依次绕Z轴,X轴旋转到与XOY平行的平面上,旋转矩阵分别为

$$T'_z = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T'_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}$$

P_1, P_2, P_3 旋转到与XOY平行的平面上就很容易求出圆心,将圆心再依次绕X轴,Z轴反向旋转 β 和 α ,即得到 O' ,转台中心轴线的方向和位置得

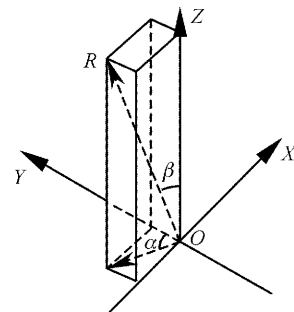


图3 转轴R的方向及 α, β 角
Fig. 3 Direction of R and angle α and angle β

到确定。

4 测量实例

图 4 是自行研制的四轴激光扫描测量系统实际测量点云数据图,图 5 是网格建模后的真实感显示,其中转台中心轴线采用上述方法标定,转轴上的 O' 为 $(2.753, -98.275, 1.1601)$, 方向矢量为 $(-1.837, -0.179, 10000.0)$, 转轴 R 在 XOY 面上的投影与 Y 轴夹角 α 为 84.42° , R 与 Z 轴的夹角 β 为 0.01° 。

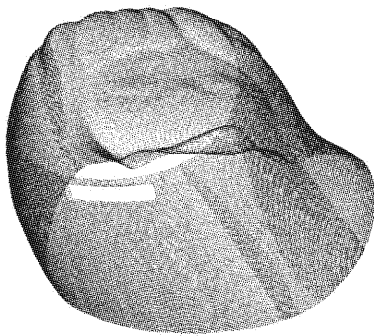


图 4 五个不同角度测量数据点云的自动旋转拼合
(物体外部尺寸 $120\text{ mm}\times 90\text{ mm}\times 130\text{ mm}$, 采样间隔 0.5 mm)

Fig. 4 Registration of multi-view at five different viewpoints

(Maximum size $120\text{ mm}\times 90\text{ mm}\times 130\text{ mm}$, sample space 0.5 mm)

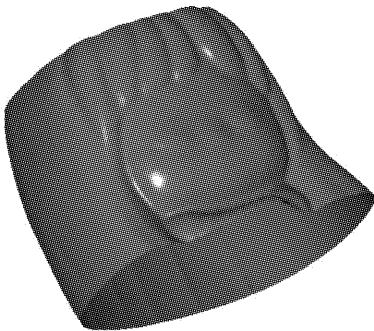


图 5 网格建模后的真实感显示

Fig. 5 Rendering of mesh model

不同方位的测量数据绕转台中心轴线 R 进行旋转。测量点 $P(x_i, y_i, z_i)$ 绕转台中心轴线旋转 θ 角的点为 $P'(x'_i, y'_i, z'_i)$, 采用齐次坐标、矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{+M}\mathbf{T}_{-Z}\mathbf{T}_{-X}\mathbf{T}_\theta\mathbf{T}_{+X}\mathbf{T}_{+Z}\mathbf{T}_{-M} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix},$$

其中

$$\mathbf{T}_{-M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_0 \\ 0 & 1 & 0 & -y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_{+Z} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_{+X} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_{-X} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_{-Z} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_{+M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

式中 (x_0, y_0, z_0) 转台中心为 O' , α 和 β 角参见图 3。

各矩阵主要作用如下:

- 1) \mathbf{T}_{-M} 将 XYZ 坐标系中的测量点 $P(x_i, y_i, z_i)$ 平移至 O' 为原点的坐标系;
- 2) \mathbf{T}_{+Z} 将变换后的测量点绕 Z 轴旋转 α 角;
- 3) \mathbf{T}_{+X} 将变换后的测量点绕 X 轴旋转 β 角;
- 4) \mathbf{T}_θ 将变换后的测量点绕 Z 轴旋转 θ 角;
- 5) \mathbf{T}_{-X} 将变换后的测量点绕 X 轴旋转 $-\beta$ 角;
- 6) \mathbf{T}_{-Z} 将变换后的测量点绕 Z 轴旋转 $-\alpha$ 角;
- 7) \mathbf{T}_{+M} 将变换后的测量点平移回到 XYZ 坐标系中。

系统只要记录转台中心轴线的标定参数,并读取数控转台的旋转角度,采用上述组合变换矩阵可以实现不同方位测量数据片的自动拼合。

5 误差分析

被测物体测量过程中是绕转台中心轴线 R 旋转的,旋转拼合必须绕 R 进行,若近似地绕与 Z 轴平行的 Z' 进行旋转拼合,则不可避免地带来误差。

实际标定转台中心轴线 R 的方向矢量为 $N(-1.837, -0.179, 10000.0)$,随着测量点位置升高, Z' 和 R 之间的偏差越来越大,当测量点 z 坐标值为 300 mm 时, Z' 和 R 之间的偏差

$$|\Delta x| = 1.837 \times 300 / 10000 \approx 55 \mu\text{m},$$

$$|\Delta y| = 0.179 \times 300 / 10000 \approx 5 \mu\text{m},$$

$|\Delta x|$ 和 $|\Delta y|$ 是 Z' 和 R 作为旋转轴线的中心偏差,由此产生的误差与物体表面离旋转中心的半径成正比,远离转台中心的数据点会有较大偏差,所以精确标定转台中心轴线是必要的。

实际标定过程中,由于测量机本身的精度为 ± 0.05 mm,其误差直接影响球心 P_1, P_2, P_3 的计算,从而影响转轴标定结果。为了分析测量误差对转轴标定的影响,仍采用标定球,如图 6,标定球球心到转台中心的距离约为 80 mm,首先在 0° 角位置测量并计算球心,然后每隔 45° 依次测量其他 7 个位置处的球心,并绕转轴转回 0° 角位置,表 1 列举了 7 个位置测量的球心绕转轴回转到 0° 位置与 0° 角位置未旋转的球心 X, Y, Z 坐标的差。

表 1 不同位置球心旋转复位后的误差 (单位 μm)

Table 1 Rotation restoration error of the different position centers of sphere (unit: μm)

Degree/ $(^\circ)$	ΔX	ΔY	ΔZ
45	-5.5	-10.3	-3.3
90	-70.5	-41.7	-11.0
135	-3.3	-49.0	-7.1
180	23.9	22.6	4.1
225	8.7	49.2	-9.5
270	-26.7	9.0	-12.9
315	-4.7	1.7	-2.9

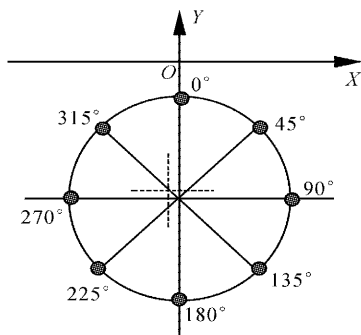


图 6 标定球在转台上 8 个角度的旋转位置

Fig. 6 Ball turn around the axis at 8 different angles

从表 1 中可以看出,当旋转角为 90° , ΔX 偏差最大,达到 $-70.5 \mu\text{m}$;当角度大于 135° 时, ΔY 为正,小于等于 135° 时, ΔY 为负;说明实际标定转轴中心在理想中心的左上位置(图 6 中十字虚线的交点)。通过测量标定球在多个不同位置的球心,增加计算点数可以提高转轴标定精度,减小偏差。

另外,为减小测量误差,实际测量时要尽量将被测物置于转台中心,这样旋转产生的偏差会减小。

6 结 论

通过旋转转台,测量固定在转台上的标定球在不同位置球心的方法能够较精确地标定转台中心轴线的参数,实现多视角测量数据在线自动拼合。对于精度为 $50 \mu\text{m}$ 的测量机,在半径 80 mm 的旋转范围内,拼合误差约为 $70 \mu\text{m}$ 。与以前的拼合方法相比,具有简单、高效的特点。这种方法同样适用于其他安装转台的测量系统。

参 考 文 献

- Zhang Shunde, Lu Bingheng, Ding Yucheng. Study on data registration of subdivided shapes in optical 3-D profile [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(6): 533~536
张舜德,卢秉恒,丁玉成. 光学三维形面分区测量数据的拼接研究 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(6): 533~536
- Tian Xiaodong, Zhou Xionghui, Ruan Xueyu. A system method for multi-view data merging of wrap object [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2001, **20**(3): 472~474
田晓东,周雄辉,阮雪榆. 全体件表面数字化多视拼合的系统方法 [J]. *机械科学与技术*, 2001, **20**(3): 472~474
- Sun Shiwei, Wang Gengyun, Li Zhigang. A combination method for multiple-view point clouds in reverse engineering [J]. *Computer Aided Engineering*, 2002, **1**: 8~12
孙世为,王耕耘,李志刚. 逆向工程中多视点云的拼合方法 [J]. *计算机辅助工程*, 2002, **1**: 8~12
- Wu Min, Zhou Laishui, Wang Zhandong et al.. Research of multi-view registration and integration on measured point cloud data [J]. *J. Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2003, **35**(5): 552~557
吴敏,周来水,王占东等. 测量点云数据的多视拼合技术研究 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2003, **35**(5): 552~557
- P. J. Besl, N. D. McKay. A method for registration of 3-D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(2): 239~256
- C. Dorai, Gang Wang, A. K. Jain. Registration and integration of multiple object views for 3D model construction [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **20**(1): 83~89
- S. J. Umeyama. Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(4): 376~380
- R. Bergevin, M. Soucy, H. Gagnon et al.. Towards a general multi-view registration technique [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, **18**(5): 540~547
- Xu Zhiqin, Sun Changku, Zheng Yizhong. Structure parameters' optimization design of the color 3D laser scanning measurement system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9): 839~842
许智钦,孙长库,郑义忠. 彩色三维激光扫描系统结构参数的优化设计 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(9): 839~842