

基于多个线激光传感器旋转扫描的铸钢车轮 在线三维测量技术

陈瀚¹, 张思瑾², 高见², 王涛², 马德清², 李中伟^{1*}, 钟凯¹, 王从军¹, 史玉升¹

¹华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

²信阳同合车轮有限公司, 河南 信阳 464100

摘要 提出一种基于二维轮廓数据的旋转扫描系统标定方法。分别对每个传感器采集的二维轮廓数据提取关键特征,通过建立特征间的匹配关系来实现多传感器相对位姿的精确标定;利用激光平面、标靶和转轴三者的几何约束关系来求解转轴的初始解,同时根据标靶的几何尺寸建立目标优化函数,迭代求解出转轴的精确解。实验结果表明,系统测量精度可达0.08 mm,测量时间为20 s,所提方法不仅可替代人工检测,实现车轮尺寸的在线测量,还可以推广应用到其他大型回转体三维测量中。

关键词 测量; 尺寸检测; 线激光传感器; 多视拼合; 转轴标定

中图分类号 TG806; TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0704006

Online Three-Dimensional Measurement Technology for Steel Wheel Based on Rotating Scanning of Multiple Line-Laser Sensors

Chen Han¹, Zhang Sijin², Gao Jian², Wang Tao², Ma Deqing², Li Zhongwei^{1*},
Zhong Kai¹, Wang Congjun¹, Shi Yusheng¹

¹State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Hubei, Wuhan 430074, China;

²Xinyang Amsted Tonghe Wheels Co., Ltd., Henan, Xinyang 464100, China

Abstract A calibration method for a rotary scanning system is proposed based on two-dimensional profile data. Firstly, key features of two-dimensional profile data collected by each sensor are extracted, and the accurate calibrations for relative poses of multiple sensors are achieved by establishing the matching relationship of the obtained features. Secondly, initial solution of the rotating axis is estimated based on the geometric constraint among the laser plane, target, and rotating axis. Meanwhile, the target optimization function is established based on the target radius size, and the precise pose of the rotating axis can be solved iteratively. Experimental results show that the measurement accuracy reaches 0.08 mm, and the measurement time is 20 s. The proposed method can replace the manual detection, achieve on-line measurement of wheel size, and be applied to 3D measurements for other large rotators.

Key words measurement; dimension inspection; line-laser sensor; multi-view registration; axis calibration

OCIS codes 120.6650; 280.3420; 150.1488; 040.1490

1 引言

铸钢车轮作为列车最重要的行走部件,其制造精度直接影响车辆的运行安全和稳定^[1],因此生产过程中必须对车轮进行充分的检测,以保证其出厂质量。目前,生产线上车轮尺寸检测主要依靠人

工卡尺来完成。由于该部件尺寸较大、形状复杂且需检测项目多,人工检测存在重复性差、出错率高和效率低等问题。

为了实现生产线上铸钢车轮关键几何尺寸的高精度三维检测,必须快速地获取其完整的高精度三维形面数据。结构光三维测量技术主要包括正弦光

收稿日期: 2019-01-28; 修回日期: 2019-02-24; 录用日期: 2019-03-28

* E-mail: zwli@hust.edu.cn

栅投影的相位轮廓测量技术^[2-4]和线激光投影的三维扫描技术^[5-7],具有测量速度快和分辨率高等特点,近年来已广泛应用于复杂工业零部件的三维形面测量。其中,正弦光栅投影的相位轮廓测量技术可单次测量一个面,具有速度快的优点;但为了保证测量的稳定性,该技术通常要求被测物体表面呈现良好的漫反射特性,这极大限制了其应用范围。而线激光投影的三维扫描技术采用高光强的激光光源,能够有效抵抗环境光的干扰以及金属反射光对图像的影响,可更广泛地应用于工业零件的在线检测。

针对车轮体积大、高反光和曲面复杂等特点,在此采用一种基于多个线激光传感器旋转扫描的方式,快速获取车轮完整的高精度三维形面数据。为了将不同传感器在不同时刻扫描得到的二维轮廓数据精确统一到全局坐标系下,需解决两个关键问题:1)多个线激光传感器测量坐标系的统一;2)转轴转轴在传感器测量坐标系下的参数标定。这两个问题都属于数据拼合问题,最直接的方法是利用线激光传感器中的视觉单元(相机)实现线激光传感器的姿态解算和转轴标定。张启灿等^[8-10]通过对相机采集的标靶图像进行特征点提取、匹配,并构建坐标系间变换关系来解决多传感器坐标系统一问题。吴庆阳等^[11-12]利用相机采集不同视角下的标靶图像并提取特征点,并通过拟合特征点轨迹来实现转轴的标定。这些视觉方法主要是依据小孔成像模型对相机间的相对位姿及转轴进行标定,其标定精度取决于图像采集的清晰程度和特征提取的精度。然而,现有的线激光传感器为了获得更大的测量景深,大多采用沙姆相机^[13-14]代替普通相机。将沙姆相机中的透镜相对成像平面旋转一定角度,以满足沙姆定律并增大相机景深。与传统的小孔成像不同的是,沙姆相机成像只有在特定倾斜角度下、很窄的平面上才能清晰成像^[15-16]。而在实际生产线上,受标靶位置摆放限制,沙姆相机只能采集到模糊的标靶图像,使得上述视觉方法的标定精度难以保证^[17-18]。

基于上述分析,本文提出一种基于二维轮廓数据的旋转扫描系统标定方法。该方法分为两部分:1)多个线激光传感器测量坐标系的统一。对每个传感器采集的二维轮廓数据提取关键特征,通过关键特征间匹配关系计算出每个传感器测量坐标系间的转换关系,实现多传感器测量坐标系的统一。2)转轴标定。首先利用激光平面、标靶和转轴间的约束关系,构建几何约束方程,求解出转轴的初始解;然后利用标靶尺寸约束建立优化方程,迭代求解出转

轴的精确位姿。所提方法实现了基于多个线激光传感器旋转扫描的铸钢车轮高精度在线三维测量与关键尺寸的分析。

2 系统组成及原理

2.1 系统组成

铸钢车轮在线三维测量系统示意图如图1所示。这里采用的测量方式是利用多个线激光传感器配合精密旋转平台对车轮进行三维扫描,以实现铸钢车轮三维形面数据的完整获取。该系统主要由5个线激光传感器、龙门架以及旋转平台等组成。5个线激光传感器分布在旋转平台轴线一侧,固定于龙门架上,用于获取车轮不同区域的轮廓数据;旋转平台台面设计成十字支撑结构,以减少车轮与台面的接触面积,从而便于获取完整的车轮数据。其中,在相邻传感器安装时通过传感器紧固装置对传感器位置进行微调。调整时,首先在龙门架上固定一个铅垂线;然后在相邻传感器公共激光区域放一块平板,对相邻两个传感器进行微调,使得两个传感器激光平面均过该铅垂线,同时使在平板上的激光条纹重叠,则这两个传感器激光平面即为共面;保持铅垂线不动,以同样的方式来调整其余传感器,使得5个传感器激光平面共面。安装转轴时,利用水平仪对台面进行水平校准。由于转轴在设计加工时保证了旋转平台轴线与台面的垂直度,故水平校准后即可保证旋转平台轴线为铅垂方向。而激光平面微调时也过铅垂方向,因此旋转平台轴线与激光平面平行。

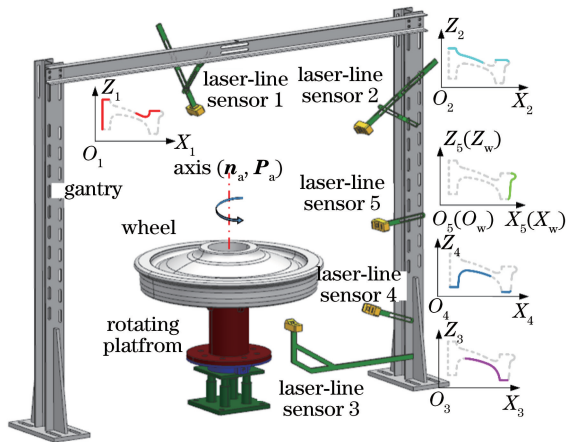


图1 铸钢车轮在线三维测量系统示意图

Fig. 1 System diagram of online 3D measurement for steel wheel

2.2 测量原理

如图1所示,测量系统中线激光传感器的测量坐标系为 $O_i X_i Y_i Z_i$, 对应的测量点坐标用 $P^i =$

$(x_p, y_p, z_p)^T$ 表示,其中序号 $i=1,2,\dots,5$ 。该测量系统以线激光传感器 5 坐标系 $O_5X_5Y_5Z_5$ 作为世界坐标系 $O_wX_wY_wZ_w$,测量点在世界坐标系下的坐标用 P_w 表示,则有

$$P_w = R_i P^i + t_i, \quad (1)$$

式中: R_i 和 t_i 分别为 $O_iX_iY_iZ_i$ 到 $O_wX_wY_wZ_w$ 的旋转和平移矩阵。

当车轮旋转扫描时,车轮绕固定转轴转动。在世界坐标系下,转轴的方向向量为 $n_a = (n_x, n_y, n_z)^T$,转轴上一点的坐标为 $P_a = (x_a, y_a, z_a)^T$ 。当旋转平台转动角度为 θ 时,线激光传感器当前视角的测量点的坐标为 P_θ ,将 P_θ 旋转至世界坐标下,有

$$P_w = R_\theta (P_\theta - P_a). \quad (2)$$

根据罗德里格斯公式:

$$R_\theta = \cos \theta I + (1 - \cos \theta) n_a n_a^T + \sin \theta \hat{n}_a, \quad (3)$$

式中: I 为 3×3 单位矩阵; n_a 为转轴方向向量; $\hat{n}_a = \begin{bmatrix} 0 & -n_z & n_y \\ n_z & 0 & -n_x \\ -n_y & n_x & 0 \end{bmatrix}$ 为由 n_a 构成的反对称矩阵。

根据(1)~(3)式,可以将多个线激光传感器旋转扫描的数据拼合在一起,从而获得车轮的完整三维数据。

3 系统标定

实现车轮的高精度三维测量的关键是精确标定出每个线激光传感器测量坐标系到世界坐标系

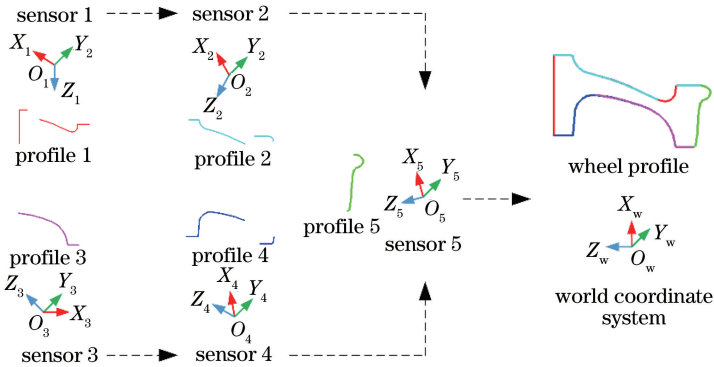


图 2 多传感器测量坐标系统一

Fig. 2 Unification of measurement coordinate systems of multiple sensors

进一步地,每个传感器测量坐标系到相邻传感器测量坐标系的平移向量 $t_{i,j}$,可以通过相邻两个传感器公共视场中标靶轮廓上的特征点(如折线的角点)计算,即

$$t_{i,j} = P_c^j - R_i P_c^i, \quad (5)$$

式中: P_c^i 和 P_c^j ($i, j = 1, 2, \dots, 5$) 分别为特征点在第

的旋转、平移矩阵,以及转台转轴在世界坐标系下的参数。在此提出一种基于二维轮廓数据的旋转扫描系统标定方法。标定时,采用阶梯圆柱体标靶,其中每一个阶梯圆柱直径以及阶梯高度均已知。由于旋转平台台面和标靶接触面采用精加工技术,因此当标靶放置在旋转平台上时,旋转平台轴线与标靶轴线平行,则激光平面、转轴和标靶轴线三者相互平行。

3.1 多传感器测量坐标系统一

多传感器测量坐标系统一如图 2 所示。微调使得 5 个线激光传感器的激光平面共面,则传感器测量坐标系到世界坐标系的旋转矩阵 R_i ,实质上是每个传感器测量坐标系绕着 O_wY_w 轴的旋转变换,即

$$R_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & 0 & -\sin \alpha_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_i & 0 & \cos \alpha_i \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: α_i 为第 i 个传感器 O_iZ_i 轴与 O_wY_w 轴的夹角。标定时,每个传感器可以获得立体靶标的表面轮廓数据。在世界坐标系下,处于同一平面或平行平面上的直线轮廓数据具有相同的方向向量。利用这一特性,通过直线拟合求解出直线在各自传感器测量坐标系下的参数方程 $a_i x_p + c_i z_p + d_i = 0$ (a_i, c_i, d_i 为所拟合直线的参数),则可由参数 a_i, c_i 构成直线的方向向量 e_i ,由此可计算出夹角 $\alpha_i =$

$$\arccos \frac{e_i \cdot e_5}{|e_i| \cdot |e_5|}。$$

i, j 传感器测量坐标系下的坐标,其中 $t_{i,i} = \mathbf{0}$ 。因此,每个传感器测量坐标系到世界坐标系的平移向量 t_i 为

$$t_i = t_{i,j} + t_{j,5}. \quad (6)$$

3.2 转轴标定

为了标定转轴在世界坐标系下的参数,首先需

要求解出转轴的方向向量 $\mathbf{n}_a = (n_x, n_y, n_z)^\top$ 。根据标靶和转轴的几何关系,线激光传感器 5 的激光平面与标靶的圆柱面的交线为一条平行于转轴的直线,求解出该直线在世界坐标系下的方向向量,即可获得转轴的方向向量。标定时,标靶旋转一周,传感器 5 测量获得 m 条直线,可求解出一组直线方向向量集 $\{\mathbf{t}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_m\}$,其中 $\mathbf{n}_k = (x_k, 0, z_k)^\top (k=1, 2, \dots, m)$ 为第 k 条直线的方向向量。根据方向向量间的一致性来构建最小二乘问题,最小二乘方程表示为

$$\operatorname{argmin} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \|1 - \mathbf{n}_a^\top \mathbf{n}_k\|^2, \quad (7)$$

利用(7)式可求解出精确的转轴方向向量 \mathbf{n}_a^* ,则有

$$\begin{aligned} n_x &= \frac{\sum_{k=1}^m x_k z_k \sum_{k=1}^m z_k - \sum_{k=1}^m z_k^2 \sum_{k=1}^m x_k}{\left(\sum_{k=1}^m x_k z_k\right)^2 - \sum_{k=1}^m x_k^2 \sum_{k=1}^m z_k^2}, n_y = 0, \\ n_z &= \frac{\sum_{k=1}^m x_k z_k \sum_{k=1}^m x_k - \sum_{k=1}^m x_k^2 \sum_{k=1}^m z_k}{\left(\sum_{k=1}^m x_k z_k\right)^2 - \sum_{k=1}^m x_k^2 \sum_{k=1}^m z_k^2}. \end{aligned}$$

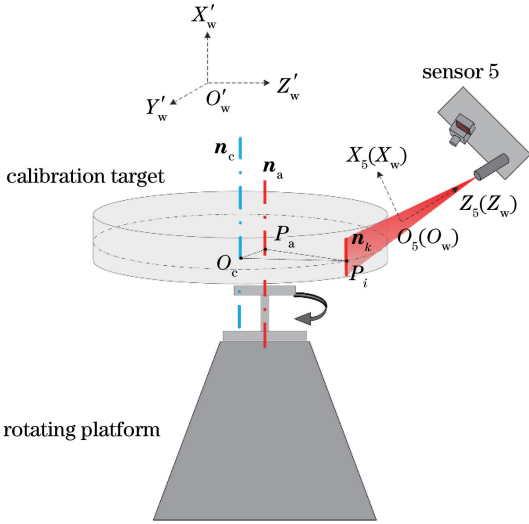


图 3 转轴标定模型

Fig. 3 Unification of measurement coordinate systems of multiple sensors

求解转轴上一点 P_a 的步骤如下:

1) 利用标靶、转轴以及激光平面的几何关系来求解转轴位置的初始解。如图 3 转轴标定模型所示,当标靶旋转时,标靶轮廓线在线激光传感器 5 测量坐标系下作平移运动。在垂直于转轴的平面上,激光平面与标靶交点 P_i 的位置坐标为 $\mathbf{P}_i = (x_i, y_i, z_i)^\top$,标靶的圆心 O_c 的位置坐标为 $\mathbf{O}_c = (x_c, y_c, z_c)^\top$,转轴上的一点 P_a 的位置坐标为 $\mathbf{P}_a =$

$(x_a, y_a, z_a)^\top$ 。为了简化求解过程,先将 $O_w X_w Y_w Z_w$ 绕 $O_w Y_w$ 轴旋转至 $O'_w X'_w Y'_w Z'_w$,使得 $O'_w X'_w$ 轴与转轴方向 \mathbf{n}_a 保持一致,旋转角度可以根据转轴方向向量 \mathbf{n}_a 与 $O_w Y_w$ 求得,这样可以保证 P_i 点沿着 $O'_w X'_w$ 轴运动。由图 3 中简单的几何关系可得

$$\begin{aligned} \mathbf{w}^\top \mathbf{w} &= (\mathbf{u} + \mathbf{v})^\top (\mathbf{u} + \mathbf{v}) = \\ & r^2 + d^2 + 2rd \cos \beta, \end{aligned} \quad (8)$$

式中: \mathbf{w} 、 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} 分别表示 $\overrightarrow{P_a P_i}$ 、 $\overrightarrow{O_c P_i}$ 和 $\overrightarrow{P_a O_c}$,且 $|\mathbf{u}| = r$ 、 $|\mathbf{v}| = d$ 、 r 、 d 和 β 分别表示圆柱体半径、圆柱体轴线与转轴的距离以及向量 \mathbf{u} 与 \mathbf{v} 夹角。在标靶旋转过程中,当 $\beta = 0$ 时, $\mathbf{w}^\top \mathbf{w}$ 取得最大值,测量点 P_i 的位置坐标 $\mathbf{P}_i = (x_i, 0, z_i)^\top$ 沿着 $O_w Z'_w$ 轴达到最高值点 P_{\max} ,该点的位置坐标为 $\mathbf{P}_{\max} = (x, 0, z_{\max})^\top$;当 $\beta = \pi$ 时, $\mathbf{w}^\top \mathbf{w}$ 取得最小值,测量点 P_i 沿着 $O_w Z'_w$ 轴达到最低值点 P_{\min} ,该点的位置坐标为 $\mathbf{P}_{\min} = (x, 0, z_{\min})^\top$,则有

$$\begin{cases} (z_{\max} - z_a)^2 + y_a^2 = (r + d)^2 \\ (z_{\min} - z_a)^2 + y_a^2 = (r - d)^2 \end{cases}, \quad (9)$$

进一步解得

$$(z_{\max} + z_{\min} - 2z_a)(z_{\max} - z_{\min}) = 4rd. \quad (10)$$

由(9)、(10)式可知,在至少有两个半径不同的同轴圆柱体情况下,可求解出转轴上一点 P_a 的初始坐标。通过 P_a 初始解将测量点 P_i 旋转至世界坐标系下,即可求出标靶轴线的初始位置 \mathbf{O}_c 。

2) 根据标靶几何参数构建目标优化函数,通过迭代优化求解转轴位置的精确解。在步骤 1 的求解过程中,只用到了极少的测量数据,因此转轴位置标定精度受噪声的影响较大。针对这一问题,提出了基于标靶尺寸约束优化的转轴求解方法。标靶旋转过程中,当转台转动角度为 θ_l 时,测量点位置为 $\mathbf{P}_{\theta l}$,旋转矩阵为 $\mathbf{R}_{\theta l}$,旋转一周可获得 n 个测量点(测量点数 $l=1, 2, \dots, n$),则目标优化函数为

$$\begin{aligned} e &= \min \frac{1}{2} \sum_{l=1}^n |(\mathbf{R}_{\theta l} \mathbf{P}_{\theta l} - \mathbf{R}_{\theta l} \mathbf{P}_a - \mathbf{O}_c)^\top \cdot \\ & (\mathbf{R}_{\theta l} \mathbf{P}_{\theta l} - \mathbf{R}_{\theta l} \mathbf{P}_a - \mathbf{O}_c) - r^2|^2. \end{aligned} \quad (11)$$

采用非线性最小二乘迭代优化方法(如 Levenberg-Marquardt 方法)求解(11)式,即可计算出转轴位置参数 \mathbf{P}_a 的最优解。该求解过程最大化地利用了标定过程中采集到的测量数据,从而使得标定结果精度更高、稳健性更好。

4 实验与分析

基于所提出的技术,开发了一套铸钢车轮在线

三维测量系统,如图 4 所示。该测量系统主要由旋转平台(三菱 HG-SR152BK)和 5 个线激光传感器(LMI Gocator2380,加拿大)组成。其中旋转平台的定位精度为 0.0012° ,5 个线激光传感器的重复性精度为 0.012 mm ,扫描速度为 $170\sim 5000\text{ Hz}$,激光线轮廓点数为 1280,测量范围为 800 mm 。

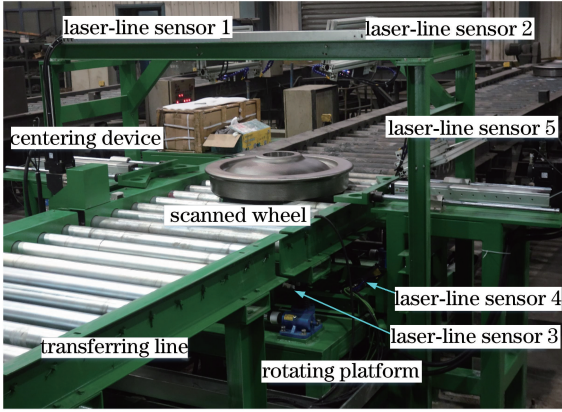


图 4 铸钢车轮在线三维测量系统

Fig. 4 System of online 3D measurement for steel wheel

4.1 系统标定

在系统标定时,将设计的标靶放置在旋转平台上,标靶如图 5 所示。旋转平台带动标靶以速度为 $18\text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$ 匀速旋转,同时旋转平台的编码器同步触发 5 个线激光传感器以速度为 $150\text{ frame}/\text{s}$ 采集标靶轮廓数据,旋转一圈后共采集 3000 frame 轮廓数据。轮廓数据采集完成后,对每个线激光传感器采集的轮廓数据进行分割,提取直线和特征点,并按照上述标定方法完成系统标定。转轴标定结果为:

$\mathbf{n}_a = (1, 0, 0)^T$, $\mathbf{P}_a = (0, 22.3648, -217.383)^T$ 。线激光传感器间相对位姿结果为: $\alpha_1 = 113.522^\circ$, $\alpha_2 = 63.0561^\circ$, $\alpha_3 = 100.118^\circ$, $\alpha_4 = 59.3174^\circ$, $\alpha_5 = 11.7428^\circ$ 。每个传感器测量坐标系到世界坐标系的

$$\text{平移向量为: } \mathbf{t}_1 = \begin{bmatrix} 114.2823 \\ 0 \\ 53.0437 \end{bmatrix}, \mathbf{t}_2 = \begin{bmatrix} -114.6316 \\ 0 \\ 95.2711 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{t}_3 = \begin{bmatrix} -172.131 \\ 0 \\ 240.0032 \end{bmatrix}, \mathbf{t}_4 = \begin{bmatrix} 131.8211 \\ 0 \\ 191.4863 \end{bmatrix}, \mathbf{t}_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}。$$

标定完成后,对型号为 HEZD840 的铸钢车轮进行三维测量。具体测量流程为:当车轮运送至测量工位后,首先对中机构对车轮进行对中定位,该升降辊子线下降,露出转台,承托起车轮。当车轮置于转台上后,对车轮开始进行旋转测量。测量完成后,升降辊子线上升至与其他段辊子线水平位置,将车

轮运送出检测工位。旋转测量时,旋转平台以速度为 $18\text{ }^\circ/\text{s}$ 匀速旋转,并触发 5 个线激光传感器以速度为 $150\text{ frame}/\text{s}$ 同步采集车轮轮廓数据,根据标定的传感器间相对位姿和转轴参数对测量的数据进行拼合。在同时测量 5 个传感器时,每两个三维传感器测量的数据间会出现重叠区域,拼合后的车轮三维点云数据在重叠区域会增大点云密度,导致车轮整体点云密度不均匀。因此,在测量完成后,对车轮点云数据进行均匀栅格采样来得到均匀完整的三维数据。这样车轮旋转一周后可获得完整的车轮三维形面数据,如图 6 所示。

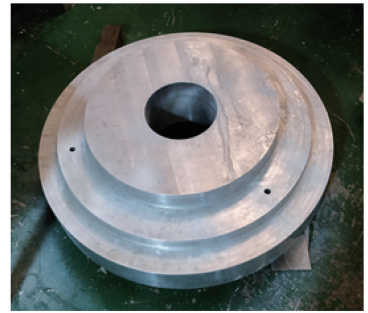


图 5 标靶

Fig. 5 Calibration target

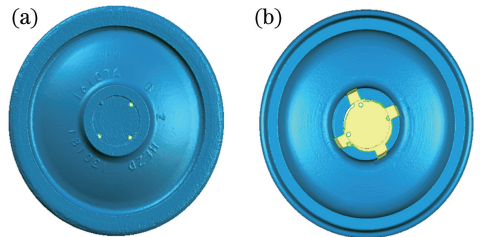


图 6 完整的三维形面数据。

(a) 车轮外侧面 ;(b) 车轮内侧面

Fig. 6 Complete data of three-dimensional surface.

(a) Outside of wheel; (b) inside of wheel

4.2 精度分析

为了验证系统的测量精度,对型号为 HEZD840 的车轮进行多次在线测量,计算车轮的全部关键尺寸。图 7 所示为车轮关键尺寸图,关键尺寸包括滚动圆直径 D 、滚动圆圆度 Y 、轮辋宽度 H 、轮辋外侧内径 D_1 、轮辋内侧内径 D_2 、轮辋内外侧面平行度 P 、内侧毂辋距 F 、轮辋内侧面外径 D_3 、轮毂孔径 d_0 、轮毂孔对踏面同轴度 C 、轮毂长度 L 、轮毂孔垂直度 V 和辐板最小厚度 T 。将轮辋面 B 偏移 $h = 70\text{ mm}$ 后的平面作为基面,基面与踏面的交线为滚动圆。将计算得到的关键尺寸数值与标准值进行对比,以验证系统的测量精度。该车轮的标准值是采用摄影测量设备(Creaform MaxSHOT 3D,加拿

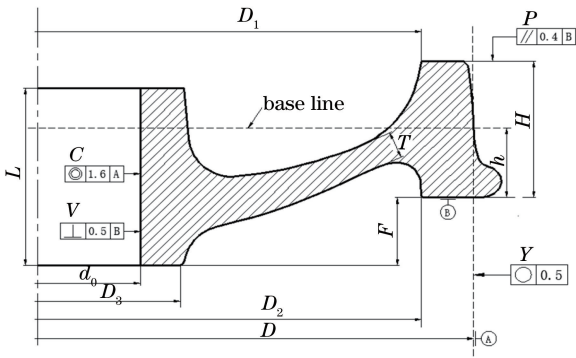


图 7 车轮关键尺寸图

Fig. 7 Dimensions of wheel

大)和 3D 手持激光三维测量设备(Creaform HANDYSCAN 700™ 3D,加拿大)配合扫描并计算获得。标准值的获取首先利用摄影测量系统采集车轮上标志点的三维坐标,然后将坐标值导入手持激光三维测量设备中进行测量,以消除多次测量产生的拼合误差,保证整体精度。其中手持激光三维测量设备的误差为 0.03 mm,满足实验要求。上述各

项关键尺寸的计算是在 Geomagic Control X 数据处理软件中完成的,并通过自动化脚本完成每个车轮所有关键尺寸的自动化计算。各项关键尺寸的计算方法为:在 Geomagic Control X 软件中首先对车轮三维点云数据进行特征分割,然后利用最小二乘法拟合出待检测尺寸所需的关键特征,最后根据构建的特征来计算各项尺寸。

实验中对该车轮进行 5 次测量,单次测量时间为 20 s,车轮关键尺寸测量结果如表 1 所示。可以看出,铸钢车轮在线三维测量系统的最大偏差在 0.08 mm 以内,标准偏差在 0.065 mm 以内。值得注意的是,手持三维测量设备的测量值为本精度实验的基准值,虽然该设备的测量精度为 0.03 mm,与本项目的精度要求 0.1 mm 较接近,但是在实际实验中手持三维测量设备的误差是随机分布的,而实验中 5 次测量结果的最大偏差均在 0.08 mm 以内,标准偏差均在 0.065 mm 以内,因此该测量系统可以满足车轮检测精度 0.1 mm 的要求。

表 1 车轮关键尺寸测量结果

Table 1 Measurement result of wheel dimensions

mm

Dimension	Measurement times					Standard value	Maximum deviation	Standard deviation
	1	2	3	4	5			
D	842.768	842.792	842.785	842.792	842.725	842.743	0.049	0.028
Y	0.347	0.389	0.362	0.383	0.374	0.388	0.041	0.017
H	139.036	139.054	139.016	139.093	139.106	139.084	0.068	0.038
D ₁	739.160	739.118	739.183	739.170	739.144	739.146	0.037	0.025
D ₂	739.379	739.378	739.350	739.390	739.347	739.383	0.036	0.019
P	0.346	0.325	0.377	0.382	0.395	0.318	0.077	0.029
F	68.364	68.404	68.3337	68.307	68.359	68.324	0.080	0.036
D ₃	282.459	282.555	282.466	282.433	282.461	282.508	0.075	0.047
d ₀	195.719	195.72	195.722	195.762	195.739	195.709	0.053	0.018
C	0.063	0.044	0.048	0.041	0.014	0.046	0.032	0.018
L	178.210	178.152	178.141	178.138	178.197	178.133	0.077	0.034
V	0.239	0.221	0.198	0.229	0.220	0.218	0.021	0.015
T	27.373	27.327	27.267	27.228	27.223	27.294	0.079	0.065

5 结 论

根据列车铸钢车轮实际生产过程中关键尺寸在线检测的需求,提出了基于多个线激光传感器旋转扫描的铸钢车轮在线三维测量技术。针对现有沙姆相机的线激光传感器难以实现旋转扫描的局限性,提出了一种基于二维轮廓数据的旋转扫描系统标定方法,该方法利用传感器获取的轮廓数据的关键特征统一多个传感器测量坐标系,然后通过构建几何约束关系求解出转轴参数的初始解,并通过建立目标优化函数得到精确解,最终实现大型铸钢车轮的旋转三维扫描。对 HEZD840 铸钢车轮进行在线测

量,并与标准值进行对比,结果表明该系统的测量精度达到 0.08 mm,测量时间为 20 s,满足实际铸钢车轮尺寸的在线检测需求。所提技术还可以推广应用到其他大型回转体三维测量的应用中,扩展了线激光传感器的应用范围。

所提出的基于多个线激光传感器旋转扫描的铸钢车轮在线三维测量技术的测量精度在满足目前实际生产需求的前提下,还有较大的提升空间。在此考虑的是一种线激光传感器激光平面与转轴平行的情况,而在实际情况下转台的回转精度、稳定性,以及转台长时间使用导致激光平面与转轴存在的夹角,均会影响整体测量的精度。后续的工作将进一

步分析转轴与激光平面存在夹角的情况,使得该系统测量精度更高、稳定性更好。

参 考 文 献

- [1] Gao X D. Development of the automatic detection device for wheelset parameters [J]. *Rolling Stock*, 2002, 40(10): 29-31.
高向东. 轮对参数自动检测装置的研制[J]. *铁道车辆*, 2002, 40(10): 29-31.
- [2] Zhong K, Li Z W, Shi Y S, *et al.* Fast phase measurement profilometry for arbitrary shape objects without phase unwrapping [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(11): 1213-1222.
- [3] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 149-158.
- [4] Yang P B, Deng L J, Chen Y, *et al.* Three-dimensional shape measurement of highly reflective objects based on structured light [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0204004.
杨鹏斌, 邓林嘉, 陈元, 等. 基于结构光的高反物体三维形貌测量方法 [J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0204004.
- [5] Liu X J, Zhao H S, Zhan G M, *et al.* Rapid and automatic 3D body measurement system based on a GPU-Steger line detector [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(21): 5539-5547.
- [6] Gao Y, Shao S Y, Feng Q B. A novel method for automatically measuring wheel geometric parameters by laser scanning [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(7): 0708005.
高岩, 邵双运, 冯其波. 一种激光扫描自动测量轮对几何参数的方法 [J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0708005.
- [7] Xie Z X, Zhang A Q. Simultaneous calibration of the intrinsic and extrinsic parameters of ultra-large-scale line structured-light sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0315001.
解则晓, 张安祺. 超大尺度线结构光传感器内外参数同时标定 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0315001.
- [8] Zhang Q C, Su X Y, Zou X P, *et al.* Calibration of 3-D measurement system using multi-sensor with line structured-illuminated laser [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3): 225-227, 232.
张启灿, 苏显渝, 邹小平, 等. 多个线结构光传感器三维测量系统的校准 [J]. *激光技术*, 2005, 29(3): 225-227, 232.
- [9] Qiu Z R, Chen P F, Li X H. Calibration of measurement system for multi-vision sensor [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, 35(5): 889-893.
裘祖荣, 陈培芬, 李杏华. 多线结构光视觉传感器测量系统的标定 [J]. *半导体光电*, 2014, 35(5): 889-893.
- [10] Li T T, Yang F, Xu X L. Method of large-scale measurement based on multi-vision line structured light sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1104003.
李涛涛, 杨峰, 许献磊. 基于多视觉线结构光传感器的大尺度测量方法 [J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1104003.
- [11] Wu Q Y, Li J Z, Su X Y, *et al.* An approach for calibrating rotor position of three-dimensional measurement system for line-structure light [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(8): 1224-1227.
吴庆阳, 李景镇, 苏显渝, 等. 线结构光三维测量系统中旋转轴的标定方法 [J]. *中国激光*, 2008, 35(8): 1224-1227.
- [12] Li P F, Zhang W T, Xiong X M, *et al.* A fast approach for calibrating 3-D coordinate measuring system rotation axis based on line-structure light [J]. *Microcomputer & its Applications*, 2015, 34(4): 73-75.
李鹏飞, 张文涛, 熊显名, 等. 基于线结构光的三维测量系统转轴快速标定方法 [J]. *微型机与应用*, 2015, 34(4): 73-75.
- [13] Steger C. A comprehensive and versatile camera model for cameras with tilt lenses [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2017, 123(2): 121-159.
- [14] Sun C, Liu H B, Chen S Y, *et al.* A general imaging model based method for Scheimpflug camera calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815009.
孙聪, 刘海波, 陈圣义, 等. 基于广义成像模型的Scheimpflug相机标定方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815009.
- [15] Steger C, Ulrich M, Wiedemann C. *Machine vision algorithms and applications* [M]. Weinheim, Germany: John Wiley & Sons, 2018: 18-93.
- [16] Merklinger H M. *Focusing the view camera: a scientific way to focus the view camera and estimate depth of field* [M]. Canada: Paperback, 1993: 29-57.
- [17] Ha H, Bok Y, Joo K, *et al.* Accurate camera calibration robust to defocus using a smartphone [C] // 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), December 7-13, 2015, Santiago, Chile. New York: IEEE, 2015: 828-836.
- [18] Wang Y W, Chen X C, Tao J Y, *et al.* Accurate feature detection for out-of-focus camera calibration [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7964-7971.