

文章编号 1004-924X(2018)12-2963-08

筒形件姿态的非接触无靶标自动综合测量及求解

张解语¹, 仇原鹰^{1*}, 宁 博¹, 杨长祺², 钟珂珂²

(1. 西安电子科技大学 电子装备结构设计教育部重点实验室, 陕西 西安 710071;

2. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

摘要:在筒形件自动化对接过程中,需对其姿态进行无靶标精密测量和调整。本文采用激光轮廓传感器对被测件进行扫描获得点云数据,推导得出点云数据的直线拟合公式,并进行了姿态拟合求解。基于蒙特卡洛数值模拟,对筒形件的轴线拟合法和母线拟合法进行比较,并根据两种方法各自的优缺点,提出采用轴线拟合法求解俯仰角、母线拟合法求解偏转角度的综合测量求解方法,显著提高了姿态测量精度。此外,探讨了截取椭圆个数、每个椭圆上的轮廓点数与姿态求解精度之间的关系,为在满足测量精度的同时兼顾测量效率提供了参考依据。最后,利用原理样机和激光跟踪仪进行了测量实验。实验结果显示,轴线姿态角测量的绝对精度优于 0.02° ,标准差低于 0.01° ,由此证明了本文方法的有效性和准确性。

关键词:非接触测量;激光轮廓传感器;精密扫描测量

中图分类号:TH741 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20182612.2963

Automatic comprehensive noncontact measurement and solution method for cylindrical workpieces without targets

ZHANG Jie-yu¹, QIU Yuan-ying^{1*}, NING Bo¹, YANG Chang-qi², ZHONG Ke-ke²

(1. Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design of Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Institute of Shanghai Spaceflight Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600, China)

* Corresponding author, E-mail: yyqiu@xidian.edu.cn

Abstract: During the automatic docking of cylindrical workpieces, it may be necessary to measure the orientation of workpieces accurately without targets. For this reason, a precision scanning method without targets was utilized. The point cloud data was obtained by a laser profile sensor, and the postures were determined by a comprehensive method. Based on Monte-Carlo simulation, the accuracies of the axis fitting method and bus section fitting method were compared, and a new comprehensive method was proposed further. In this study, the pitch angle was obtained by the axis fitting method, the deflection angle was obtained by the bus section fitting method, and the measurement accuracy was significantly improved. In addition, to balance the accuracy and efficiency, the relationship among the number of intercepted ellipses, the number of contour points on each ellipse, and the precision

收稿日期:2018-04-13;修订日期:2018-06-03.

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目资助(No. U1637211)

were discussed. Finally, a prototype experiment was conducted to prove the validity and accuracy of the comprehensive method. It is proved that the absolute accuracy of the axis attitude is better than 0.02° , and the standard deviation is less than 0.01° .

Key words: noncontact measurement; laser profile sensor; precision scanning measurement

1 引言

随着工业 4.0 理念的逐步实施,人在产品生产制造过程中所扮演的角色正逐渐由各种智能机械所代替,相应的生产线也在逐步实现自动化、智能化与柔性化。筒形件对接是工业装配领域中一个常见的过程,该过程在自动化升级时需有相应的位姿测量系统,以指导执行机构精确、高效地完成位姿调整以及自动装配。

筒形件位姿测量方法可分为接触测量与非接触测量^[1]。其中,接触测量是指通过探针或测头等得到被测物表面若干点的空间位置,并通过拟合等方式得到被测物的空间位姿^[2],比较典型的应用有三坐标测量机、关节式测量臂等。接触式测量需通过机械或人力驱动测头移动完成,效率较低,且在一些精密设备自动化生产装配中可能造成设备表面损伤。非接触测量中,激光跟踪仪(Laser Tracker System, LTS)由于测量精度高、范围广,在航空、航天装备的总装过程中得到了较为成熟的应用^[3-5]。金贺荣等^[6]将双目视觉测量技术应用于航天器舱段的水平对接,通过双目相机匹配被测舱段表面预先喷涂的靶点,完成对其位姿的测量。但在被测物表面安装或喷涂相应的靶标,可能会对零件表面产生不良影响,且对批量生产来说,会影响生产效率。

综上,一般的位姿测量方式较难同时满足对筒形件位姿非接触、无靶标以及高精度的测量需求。但激光轮廓传感器的出现为同时满足以上需求提供了新的思路^[7-8]。本文基于激光轮廓传感器提出了一种可用于自动装配系统的筒形件姿态非接触无靶标精密测量方法,并通过原理样机测量实验证明了该方法的有效性。

2 筒形件姿态测量方法及相关算法

2.1 筒形件姿态测量方法

激光轮廓传感器是一种基于线结构光三角

法^[9]的二维激光测距传感器。测量原理如图 1 所示,线激光投射器将一条光带投射至被测筒形件一侧,并被摄像机捕获,通过变换获得该轮廓线上各点在传感器坐标系 O_s 中的位置信息^[10]。测量物体表面的三维轮廓时,可使传感器的激光截面平行于坐标平面 $Y_0O_0Z_0$,驱动传感器沿平行于 X_0 轴的方向移动,同时通过编码器记录传感器的实时位置。

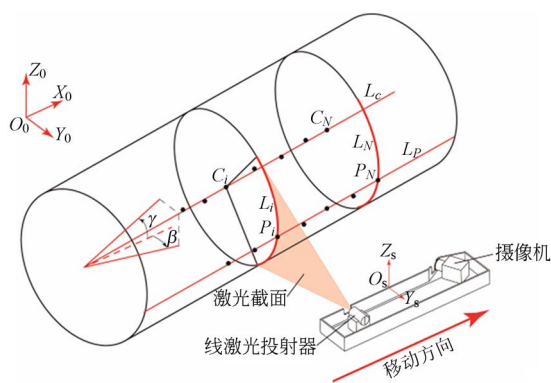


图 1 激光轮廓传感器测量原理示意图

Fig. 1 Measurement principle of laser profile sensor

筒形件轴线姿态可用相对于固定参考坐标系 O_0 的偏转角 β 以及俯仰角 γ 表示,分别对应轴线在平面 $X_0O_0Y_0$ 和平面 $X_0O_0Z_0$ 中投影的倾斜角。测量时,通过移动激光轮廓传感器对筒形件侧面进行扫描,获得位于若干平行平面 $X_0 = x_i$ ($i=1, \dots, N$) 上的轮廓数据,根据几何投影关系可知,所得轮廓为一系列相似的椭圆弧,记为 L_i 。从微观上看,这些轮廓数据为一系列离散的轮廓点,因此对于扫描获得的点云数据,可用直线拟合法进行姿态求解。首先进行轴线拟合;其次,考虑到距离激光轮廓传感器最近的一条母线的精度测量有可能最高,以该母线作为拟合对象。因此本文探讨了以下两种位姿求解方法,即:

(1) 轴线拟合法: 对椭圆弧 L_i 进行最小二乘拟合,得到相应的椭圆圆心,即轴线拟合点 C_i ,对 C_i 进行空间直线拟合,得到筒形件轴线 L_c 的方程,求得其姿态角 β 和 γ 。

(2) 母线拟合法: 在 L_i 上取具有最大 Y 坐标

点 P_i ,即距离传感器最近的点,它决定了筒形件的一条特殊母线 L_P 。对 P_i 进行拟合,也可求得零件的姿态角 β 和 γ 。

2.2 筒形件姿态求解算法

轴线拟合法中,对弧 L_i 进行最小二乘拟合时,可令目标函数为:

$$D(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^M F(x_i, y_i, \mathbf{a})^2, \quad (1)$$

式中: \mathbf{a} 为椭圆一般方程的六维系数向量,满足 $\mathbf{a}=[A, B, C, D, E, F]$, M 为椭圆弧上拟合点的个数, $F(x_i, y_i, \mathbf{a})$ 为椭圆方程的一般形式,即:

$$F(x_i, y_i, \mathbf{a}) = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F. \quad (2)$$

针对激光轮廓传感器所获得的部分椭圆数据,Rahayem^[11]等认为由 Halir 等^[12]提出的改进直接最小二乘拟合算法在效率、准确程度和抗噪声方面具有较为优秀的性能。该算法是对 Fitzgibbon 等^[13]提出的椭圆直接最小二乘算法的改进,避免了约束矩阵的奇异性给计算带来的不便,且比其它迭代算法的效率更高。

该方法中,式(1)表述为最优化问题,即:

$$D(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^M \| (\mathbf{D}_1 \mid \mathbf{D}_2)(\mathbf{a}_1 \mid \mathbf{a}_2)^T \|^2, \quad (3)$$

其中:参数矩阵 \mathbf{D}_1 和 \mathbf{D}_2 分别为:

$$\mathbf{D}_1 = \begin{pmatrix} x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i^2 & x_i y_i & y_i^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M^2 & x_M y_M & y_M^2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{D}_2 = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M & y_M & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中: (x_i, y_i) 为拟合点的坐标, $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ 为对应椭圆代数方程中的系数向量,其中 $\mathbf{a}_1 = [A, B, C]$, $\mathbf{a}_2 = [D, E, F]$ 。对于椭圆代数拟合问题来说,可令约束条件 $4AC - B^2 = 1$,写成如下矩阵形式:

$$(\mathbf{a}_1 \mid \mathbf{a}_2) \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \cdots & \cdots \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \end{pmatrix} (\mathbf{a}_1 \mid \mathbf{a}_2)^T = 1, \quad (6)$$

其中: \mathbf{R} 为一个 3×3 的反对角阵:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2 \\ 0 & -1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

这样,在式(6)存在的情况下,式(3)即是一个约束最优化问题,根据文献[12]有:

$$\begin{cases} \mathbf{D}_1^T \mathbf{D}_1 \mathbf{a}_1^T + \mathbf{D}_1^T \mathbf{D}_2 \mathbf{a}_2^T = \lambda \mathbf{R} \mathbf{a}_1^T \\ \mathbf{D}_2^T \mathbf{D}_1 \mathbf{a}_1^T + \mathbf{D}_2^T \mathbf{D}_2 \mathbf{a}_2^T = 0 \end{cases}. \quad (8)$$

对式(8)进行求解,可得到椭圆一般方程的 6 个系数 $\mathbf{a}=[A, B, C, D, E, F]$,根据椭圆的一般方程可解出对应椭圆的圆心坐标 (x_a, y_a) :

$$x_a = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2}, \quad (9)$$

$$y_a = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2}. \quad (10)$$

通过上述方法可得到椭圆圆弧 L_i 对应的轴线拟合点 C_i ,也可在 L_i 上取得母线拟合点 P_i ,分别对 C_i 和 P_i 进行空间最小二乘拟合,得到被测筒形件轴线和母线的空间位姿。

由于轴线与母线平行且都和平面 $Y_0 O_0 Z_0$ 相交,因此满足方程:

$$\begin{cases} y - px - y_0 = 0 \\ z - qx - z_0 = 0 \end{cases}, \quad (11)$$

则最小二乘的目标函数为:

$$\begin{cases} Q_y(p, y_0) = \sum_{i=1}^N (y_i - px_i - y_0)^2 \\ Q_z(q, z_0) = \sum_{i=1}^N (z_i - qx_i - z_0)^2 \end{cases}. \quad (12)$$

对式(12)进行求解,可得直线与平面 $Y_0 O_0 Z_0$ 的交点 $P_0(0, y_0, z_0)$ 以及直线的一个方向向量 $\mathbf{T}=(1, p, q)$,随后分别得出轴线和母线对应的姿态角 β 和 γ 。

3 基于蒙特卡洛模拟的精度分析

3.1 姿态综合测量求解方法

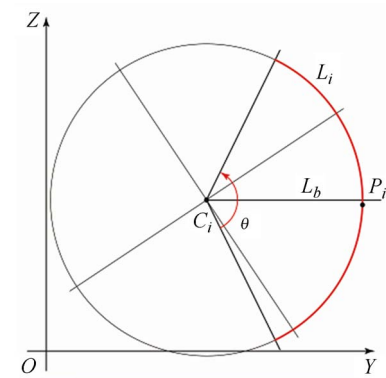
为研究上述方法的有效性,通过数值模拟,对轴线拟合点 C_i 和母线拟合点 P_i 的测量精度进行分析。以一实际筒形件为例,设筒形件轴线与平面 $Y_0 O_0 Z_0$ 的交点为 $(0 \text{ mm}, 170 \text{ mm}, 160 \text{ mm})$,轴线的单位方向向量为 $(0.999 \ 0, 0.040 \ 0, 0.020 \ 0)$,直径为 340 mm ,则根据图 1 透视关系可知椭圆弧 L_i 所对应的椭圆长轴为 $340.220 \ 9 \text{ mm}$,短轴等于被测筒形件半径,为 $170.000 \ 0$

mm, 特殊母线 L_P 和平面 $Y_0O_0Z_0$ 的交点为 $(0 \text{ mm}, 190.034 0 \text{ mm}, 9.898 0 \text{ mm})$ 。

如图 2(a)所示, 弧 L_i 对应的椭圆圆心角 θ 为 120° , 其角平分线 L_b 和 Y 轴平行, 在弧上均匀取 M 个轮廓点, 这里令 $M=1\ 000$ 。目前, 适用于 300 mm 零件的激光轮廓传感器的分辨率 R_S 约为 $0.020 \sim 0.030 \text{ mm}$ 。根据 3σ 准则, 令 $R_S=2 \times 3\sigma$, 可知测量点的标准差应在 $0.003 3 \sim 0.005 \text{ mm}$, 因此, 对轮廓点分别沿 Y 轴和 Z 轴施加标准差 $\sigma_z=0.005 \text{ mm}$, $\sigma_y=0.005 \text{ mm}$ 的高斯噪声。通过蒙特卡洛仿真^[14]得到轴线拟合点 C_i 和母线拟合点 P_i 的分布, 如图 2 所示, 统计这些点沿 Y 轴和 Z 轴分布的均值 μ_y, μ_z 和标准差 σ_y, σ_z , 如表 1 所示。

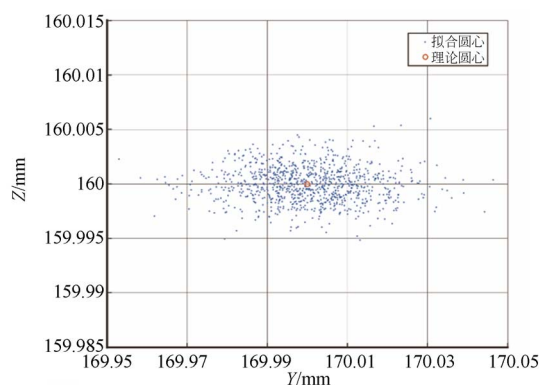
图 2(b)中, 由于弧 L_i 的测量数据全部位于 Y 轴正向一侧, 因此所得拟合圆心在 Y 轴方向分布较为稀疏且朝向弧所在一侧偏心, 精度较差。同理, 由于弧 L_i 测量数据的 Z 坐标相对椭圆真实圆心分布较为对称, 所以拟合圆心的 Z 坐标轴精度较高。由图可知, 拟合圆心分布呈橄榄形, 其较长的对称轴和 Y 轴重合。结合表 1 中的数据, 可知轴线拟合点 C_i 沿 Z 轴的标准差较小, 即测量精度较高, 但沿 Y 轴的测量精度相对较低。

图 2(c)中, 所得 C_i 分布近似呈橄榄形, 其较长对称轴与 L_i 处切线重合, 由于在点 P_i 附近弧 L_i 的斜率接近无穷大, 在噪声作用下所得 P_i 沿 Z 轴的变化范围很大, 即该方向上精度很差。结合表 1 可知, 点 P_i 沿 Y 轴方向的精度较高, 这是因为 P_i 点是筒形件上距离传感器最近的点。



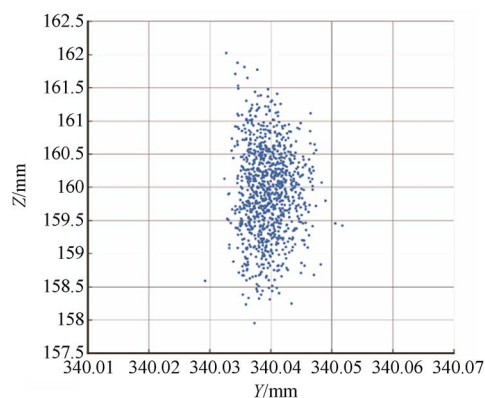
(a) 拟合参数示意图

(a) Fitting parameters



(b) 轴线拟合点 C_i 的点云分布

(b) Distribution of axis-fitting points C_i



(c) 母线拟合点 P_i 的点云分布

(c) Distribution of bus-fitting points P_i

图 2 蒙特卡洛仿真得到 C_i 和 P_i 的点云分布

Fig. 2 Distribution of C_i and P_i obtained by Monte Carlo simulation

综合对比图 2 和表 1 发现, 对于拟合点沿 Y 轴的测量标准差, 轴线拟合法高出母线拟合法一个数量级; 而对于拟合点沿 Z 轴的测量标准差, 母线拟合法远大于轴线拟合法。由于姿态角 β 和 γ 分别由拟合点的 Y, Z 坐标决定, 可知轴线拟合法对 γ 具有较高的测量精度, 母线拟合法对 β 具有较高的测量精度。

据此, 本文提出了筒形件姿态综合测量求解方法。该方法中, 采用轴线拟合法测量俯仰角 γ , 采用母线拟合法测量偏转角 β , 由于理论上轴线和母线平行, 因此所得结果仍可描述被测轴线的姿态。

表 1 蒙特卡洛仿真得到 C_i 和 P_i 的分布参数

Tab.1 Distribution parameters of C_i and P_i derived from Monte Carlo simulations (mm)

	C_i	P_i
Y 真实值	170	340.034 0
μ_y	170.000 4	340.039 7
σ_y	0.012 9	0.003 1
Z 真实值	160.000 0	159.898 0
μ_z	160.000 0	159.899 6
σ_z	0.001 6	0.677 3
σ_y/σ_z	0.124 0	218.483 9

3.2 三种测量求解方法的精度比较

根据表 1 数据对轴线拟合法、母线拟合法以及综合法的姿态求解精度进行验证。设传感器的扫描长度为 500 mm,分别沿 L_C 和 L_P 在 $X = 0 \sim 500$ mm 内均匀生成 N 个点,以模拟测量所得 N 个椭圆弧上的轴线拟合点 C_i 和母线拟合点 P_i ,为模拟前述拟合结果引入的不确定性,根据表 1 数据分别施加 $(\sigma_y, \sigma_z) = (0.012 9 \text{ mm}, 0.001 6 \text{ mm})$ 、 $(\sigma_y, \sigma_z) = (0.003 0 \text{ mm}, 0.677 3 \text{ mm})$ 的高斯噪声。令 $N=150$,通过母线拟合法、轴线拟合法和综合法分别求解姿态角 β 和 γ ,通过蒙特卡洛仿真,统计数据如表 2 所示。其中, μ_β 和 μ_γ 表示 β 和 γ 的均值, σ_β 和 σ_γ 表示 β 和 γ 的标准差。由于三种方法的测量均值是通过多次蒙特卡洛模拟得出的,因此得到的测量均值都收敛于理论值,但综合法得到的 β 和 γ 的标准差分别小于轴线拟合法和母线拟合法。综合法较轴线拟合法测量精度提高近 1 个量级,较母线拟合法提高至少 2 个量级。

表 2 仿真得到姿态角 β 和 γ 的分布参数

Tab.2 Distribution parameters of β and γ derived from Monte Carlo simulations ($^\circ$)

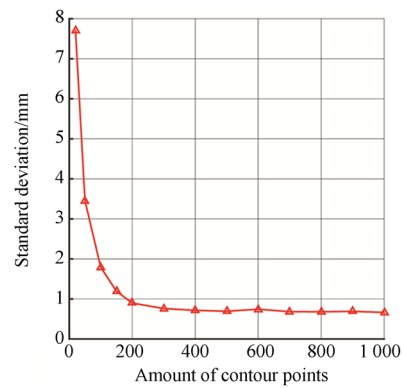
	μ_β	σ_β	μ_γ	σ_γ
理论值	2.290 6	—	1.145 8	—
轴线法	2.290 6	$4.183 1 \times 10^{-4}$	1.145 8	$5.114 2 \times 10^{-5}$
母线法	2.290 6	$1.027 1 \times 10^{-4}$	1.145 8	$2.164 0 \times 10^{-2}$
综合法	2.290 6	$9.574 5 \times 10^{-5}$	1.145 8	$5.145 2 \times 10^{-5}$

3.3 测量参数对精度的影响

3.3.1 轮廓点数对测量精度的影响

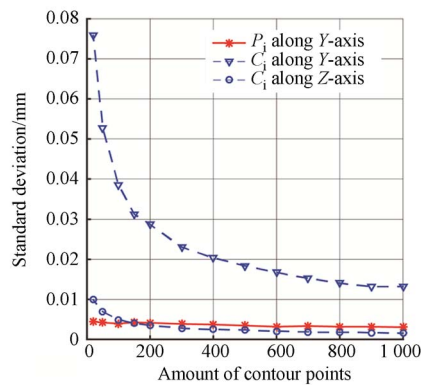
为了在满足测量精度的同时兼顾测量效率,

通过数值模拟给出轴线拟合点 C_i 和母线拟合点 P_i 的测量标准差和轮廓点数 M 之间的曲线关系,如图 3 所示。轴线拟合点 C_i 和母线拟合点 P_i 的测量标准差随着轮廓点数的增加而减小,当轮廓点数 M 大于 200 时,曲线趋于平缓。比较而言,拟合点 C_i 沿 Y 轴、Z 轴和拟合点 P_i 沿 Y 轴的估计精度较好,而 P_i 附近弧 L_i 的斜率接近无穷大, P_i 沿 Z 轴的估计精度相对较差。图 3 进一步说明,综合选取 C_i 沿 Z 轴的拟合和 P_i 沿 Y 轴的拟合,可以更好地确定筒形件的俯仰角 γ 及偏转角 β 。



(a) P_i 沿 Z 轴标准差随轮廓点数的变化曲线

(a) Standard deviation of P_i with contour points along Z-axis



(b) P_i 和 C_i 其余坐标标准差随轮廓点数的变化曲线

(b) Standard deviation of P_i and C_i with amount of contour points along other axes

图 3 P_i 和 C_i 的标准差随轮廓点数的变化

Fig.3 Standard deviations of P_i and C_i as functions of contour points

3.3.2 椭圆轮廓数对测量精度的影响

可通过给定不同的椭圆轮廓数 N ,绘制综合法中姿态角 β 和 γ 的标准差与 N 的曲线图,该曲

线为近似幂函数曲线,如图 4 所示。图中姿态角 β 和 γ 的标准差随着 N 的增加而减小,但当 N 大于 150 时,曲线变化不明显。从几何上讲,两个椭圆轮廓即可确定被测筒形件的位姿,但图 4 表明,当椭圆轮廓数 N 较少时,测量精度不理想。因此,在实际测量中,可根据图 4 选取兼顾精度和效率的截面数量。以测角精度要求达到 0.002° 为例,椭圆轮廓数可取 130。

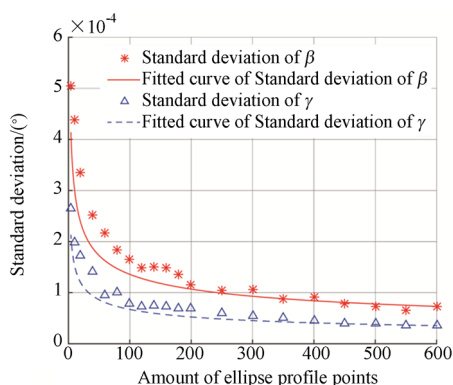


图 4 角度求解精度随椭圆轮廓数的变化关系

Fig. 4 Variation of solving accuracy with amount of ellipse profiles

4 原理样机实验

为验证本文方法的有效性,设计了筒形件轴线姿态精密测量原型系统,如图 5 所示。图中,直线模组用于驱动传感器对被测筒形件进行扫描;可调支撑用于给出被测筒形件的不同位姿;激光跟踪仪(Laser Tracking System, LTS)用于对测量结果进行验证,系统主要参数参见表 3。

首先,调姿装置调整筒形件至确定姿态,使用激光轮廓传感器测量系统对其轴线位姿进行测量,并通过轴线拟合法和综合法求解其姿态角 β

和 γ ,得到数据如表 4 所示,该数据反映了通过母线拟合法和混合方法对相同位姿进行测量的重复精度。其中,两种方法得到 β 和 γ 的均值接近 LTS 的测量值,对 γ 求解的标准差基本一致,但通过轴线拟合法求解 β 的标准差高出综合法一个数量级。由此表明,综合法对姿态角 β 具有更高的测量精度,符合前述仿真结果。但考虑到实际测量中由振动等因素引入的误差,对姿态角 β 和 γ 的实际测量精度相对仿真结果较差。

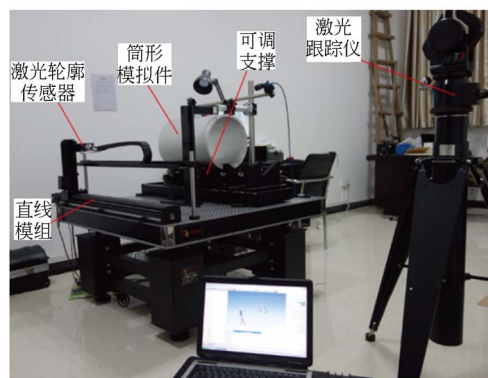


图 5 筒形件姿态自动测量实验系统

Fig. 5 Experiment system of automatic measurement for cylindrical workpieces

为进一步验证综合法的绝对精度,利用调姿装置得出被测筒形件的 3 种不同位姿,通过实验系统和 LTS 同时对筒形件姿态进行测量,计算两种测量方式的相对偏差量 $\|\Delta\beta\|$ 和 $\|\Delta\gamma\|$,结果如表 5 所示。表中,二者的测量误差小于 0.02° ,说明综合法具有较好的绝对精度。此外,表 4、表 5 为激光跟踪仪和原型系统通过若干点拟合得出的测量结果,较好避免了单点定位精度差的问题,相较于表 3 中给出的传感器单点定位精度指标提高了一个数量级。

表 3 实验设备的主要参数

Tab. 3 Main parameters of experimental equipment

设备名称	设备型号	主要性能参数
激光轮廓传感器	Gocator 2350	X 向分辨率/mm:0.019—0.060 Z 向分辨率/mm:0.150—0.300
直线模组	KK100	定位精度:0.02 mm
模拟筒形件	—	长度:600 mm 直径:340 mm
激光跟踪仪	API T3	测量精度: 50×10^{-6}

表 4 轴线拟合法和综合法的求解结果

Tab.4 Attitude angles obtained by axis-fitting method and synthesis method (°)

测量序号	轴线拟合法		综合法	
	β	γ	β	γ
①	-1.076	1.354	-1.093	1.353
②	-1.099	1.353	-1.092	1.351
③	-1.104	1.352	-1.091	1.351
④	-1.092	1.351	-1.092	1.350
⑤	-1.088	1.354	-1.091	1.353
测量均值	-1.092	1.353	-1.092	1.351
LTS 测量值	-1.093	1.348	-1.093	1.348
标准差	0.010	0.001	0.001	0.001

表 5 实验装置和 LTS 的姿态测量数据

Tab.5 Attitude data obtained by experiment system and LTS (°)

测量序号	方法	β	γ	$\ \Delta\beta\ $	$\ \Delta\gamma\ $
①	原理样机	-1.600	2.580	0.010	0.008
	LTS	-1.610	2.587		
②	原理样机	-0.624	2.884	0.001	0.012
	LTS	-0.623	2.896		
③	原理样机	1.784	-1.146	0.013	0.014
	LTS	1.796	-1.159		
	平均误差			0.008	0.011
	最大误差			0.013	0.014

5 结 论

本文提出了一种基于激光轮廓传感器的筒形件姿态精密测量方法。该方法可以在不依赖靶标的前提下自动、精密地测得筒形件轴线的两个姿态角,为筒形件的自动化装配提供必要的调姿参数,从而驱动姿态调整装置完成后续装配。针对激光轮廓传感器获得的扫描数据,本文研究了轴线拟合法和母线拟合法,进而提出了综合姿态求解算法。蒙特卡洛数值模拟结果表明,综合法兼具了轴线拟合法与母线拟合法的优点,显著提高

了姿态测量精度。同时,还给出了椭圆轮廓点数、椭圆轮廓数和测量精度之间的关系曲线,为兼顾测量精度与效率提供了参考依据。最后,在原理样机实验中引入第三方测量设备 LTS 进行验证,证明了本文方法和仿真结果的正确性,轴线姿态角测量的绝对误差小于 0.02° ,标准差小于 0.01° 。

本文方法获得的筒形件轴线位姿参数由点云数据拟合得出,有利于测量精度的提高。同时,摆脱了传统位姿测量方式对靶标的依赖,相比机器视觉的测量方式可靠性更高,且装置紧凑,便于集成到筒形件的装配生产线中。

参考文献:

[1] 李明富,马建华,张玉彦. 基于机器人的空间坐标测量技术研究现状及发展趋势[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(12): 1818-1825.
LI M F, MA J H, ZHANG Y Y. The state and development tendency of the space coordinate measur-

ing technology via robots[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2014, 33(12): 1818-1825. (in Chinese)
[2] 全燕鸣,黎淑梅,麦青群. 基于双目视觉的工件尺寸在机三维测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4):1054-1061.
QUAN Y M, LI SH M, MAI Q Q. On-machine 3D

- measurement of workpiece dimensions based on binocular vision[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 1054-1061. (in Chinese)
- [3] 文科, 杜福洲, 张铁军, 等. 舱段类部件数字化柔性对接系统设计与试验研究[J]. *航空制造技术*, 2017, 530(11): 24-31.
WEN K, DU F ZH, ZHANG T J, *et al.*. Research on design and experiment for digital flexible aligning system of cabin components[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 530(11): 24-31. (in Chinese)
- [4] 马剑锋. 导弹数字化柔性对接系统设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
MA J F. *Design and Experimental Study of Digital Missile Assembly System*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [5] 熊涛. 卫星自动对接技术研究[J]. *航空制造技术*, 2011(22): 27-30.
XIONG T. Automatic docking technology of satellite[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011(22): 27-30. (in Chinese)
- [6] 金贺荣, 刘达, 于斌, 等. 舱段自动装配位姿求解方法研究[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(1): 88-92.
JIN H R, LIU D, YU B, *et al.*. Study on posture solution method of automatic assembly of cabins[J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(1): 88-92. (in Chinese)
- [7] RAHAYEM M R, KJELLANDER J A P. Quadric segmentation and fitting of data captured by a laser profile scanner mounted on an industrial robot[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 52(1): 155-169.
- [8] 魏振忠, 张广军. 结构光三维视觉检测中光条椭圆拟合方法与仿真研究[J]. *仪器仪表学报*, 2003, 24(1): 69-74.
WEI ZH ZH, ZHANG G J. An elliptical fitting method of light stripe and its simulation for structured light based 3D vision inspection[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, 24(1): 69-74. (in Chinese)
- [9] 杨宇, 阚凌雁, 于佳, 等. 基于激光扫描的人脸三维重建方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(12): 3946-3950.
YANG Y, KAN L Y, YU J, *et al.*. Face 3D reconstruction based on laser scanning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3946-3950. (in Chinese)
- [10] 陈新禹, 马孜, 陈天飞. 线结构光传感器模型的简易标定[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2345-2352.
CHEN X Y, MA Z, CHEN T F. Calibration model for line structured light vision sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2345-2352. (in Chinese)
- [11] RAHAYEM M, WERGI N, KJELLANDER J. Best ellipse and cylinder parameters estimation from laser profile scan sections[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2012, 50(9): 1242-1259.
- [12] HALÍR R. Robust bias-corrected least squares fitting of ellipses[C]. *Proc. Eighth Int. Conf. in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Interactive Digital Media*, 2000, 1: 36-43.
- [13] FITZGIBBON A W, PILU M, FISHER R B. Direct least squares fitting of ellipses[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(5): 477-480.
- [14] SCHALK P, O'LEARY P, OFNER R, *et al.*. Measuring and analyzing cross-sectional profiles of rotating objects using light sectioning[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2008, 57(10): 2329-2338.

作者简介:



张解语(1991—),男,博士研究生,2014年于西北工业大学获得学士学位,主要研究方向为电子机械系统动力学与控制、智能机器人技术。E-mail: xdzhangjieyu@sina.com

通讯作者:



仇原鹰(1955—),男,教授,博士生导师,1982、1987年于西北工业大学分别获得学士、硕士学位,2002年于西安电子科技大学获得博士学位,主要研究方向为机械CAD/CAE/CAM,机电一体化。E-mail: yyqiu@mail.xidian.edu.cn