

文章编号 1004-924X(2014)06-1524-07

基于三维激光扫描的移动大尺寸圆柱体 工件长度快速检测系统

周 森*, 郭永彩, 高 潮, 吴小燕

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要:针对移动大尺寸圆柱体工件两端的表面形貌特征,利用三维激光扫描仪设计了一种快速长度在线检测系统。基于三维激光扫描仪可在短时间内连续高速获取大量测量数据的特点,系统在虚拟环境下构造出自适应测量形状的虚拟测量基准面,采用二维误差分离方法抑制系统误差和运动误差,识别定位工件两端端点并计算其到虚拟测量基准面的位移;最后结合多传感器融合模型获取三维位移场测量结果。另外,测试前用三坐标测量机精密测量过的相似形状圆柱体工件对系统进行了校准修正。为验证系统的精度和可靠性,分别对处于 $(1\ 000\pm 25)$ mm内不同直径的圆柱体工件进行了长度检测。结果显示,系统可在1 s完成直径约为50 mm工件的长度测量,检测分辨力为0.010 mm,检测精度达到0.050 mm。实际运行结果表明,该设计系统具有高自动性和高效性,可满足在线生产中对大尺寸工件控制和检测的要求。

关键词:大尺寸圆柱体工件;激光扫描;虚拟测量基准面;三维位移场测量;多传感器融合

中图分类号:TB92; TN247 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142206.1524

Rapid length measuring system for mobile and large scale cylinder workpieces based on 3D laser scanning

ZHOU Sen*, GUO Yong-cai, GAO Chao, WU Xiao-yan

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of the Ministry of Education,
Chongqing University, Chongqing 400030, China)

* Corresponding author, E-mail: zhousen@cqu.edu.cn

Abstract: A novel rapid on-machine length measuring system based on 3D laser scanning was developed for mobile and large scale cylinder workpieces. By using the outstanding characters of laser scanners on fast continuously acquiring the mass of measurement points in a very short time, the multi-sensor fusion technique and a 2D error separation method were respectively introduced in this system in a virtual environment. Virtual measurement datum planes were established based on virtual registration sites, which followed the variant surface of measurement target. Then, the 3D displacement field measurements between end points and virtual measurement datum planes were built. A similar cylinder workpiece measured by Coordinate Measuring Machine (CMM) was applied to calibration of the system. Finally, the experiments on the cylinder workpieces $(1\ 000\pm 25)$ mm with different diameters were carried out to determine the accuracy and reliability of measuring system. The experimental

收稿日期:2013-11-18;修订日期:2013-12-19.

基金项目:教育部重点科研资助项目(No. 1081741);重庆市自然科学基金资助项目(No. CSTC. 2008BB3169)

results indicate that a workpiece with a diameter about 50 mm is perfectly measured in only 1 s with the resolution less than 0.010 mm and the measuring precision over 0.050 mm. According to the actual operation results, this proposed measuring system is characterized by high automation and high efficiency, and can be well acceptable for application as online length detection for large scale workpieces in industrial production.

Key words: large scale cylinder workpieces; laser scanning; virtual measurement datum; 3D displacement field measurements; multi-sensor fusion

1 引言

大尺寸工件的几何尺寸检测在工业制造过程中起着重要作用,它直接影响着最终的产品合成和质量^[1-3]。随着汽车,航天航空,家庭产品应用的发展,大尺寸圆柱体的长度精密测量也越来越引起广泛的关注^[4]。传统的大尺寸圆柱体长度测量大多采用接触式的三坐标测量机(CMM),可实现很高的测量精度,但也需要花费大量的测量时间^[5]。近年来,随着机器视觉、光学传感技术的引入,三坐标测量机的效率大大提升,可以更好地满足测量要求。另外,为了更加有效高速的测量,多站点关键部分测量准则也被更多的系统采用^[6]。目前,大尺寸圆柱体长度测量系统设计正朝着高精度、高效率、人机交互界面、自动化、自适应性强、洁净化的模式发展。

三维激光扫描能在极短的采样周期内对测量目标获取大量的测量点,对于测量目标的表面形状的多样性和复杂性,线激光扫描模式还可灵活调整测量的姿态,实现更加全面的目标信息采集^[7-8],因此该技术受到广泛关注。另外,计量软件的发展也为几何尺寸测量提供了从高精度物理基准到多样性虚拟基准的跳跃^[9]。在虚拟环境下,根据测量目标的不同设计不同需求的基准,能提高系统测量的多适应性并解决高精度物理基准难以加工的问题。同时,在虚拟环境下,对多测量站点的信息融合可以更好地提高测量精度,为不同形状的大尺寸几何量测量提供了新的思路^[10]。

本文针对移动大尺寸圆柱体工件的表面形貌特征,提出在虚拟环境下,利用多静态激光扫描仪搭建新型非接触、快速、无损、精确的在线长度检测系统。系统通过自适应测量目标表面形状方法

建立虚拟测量基准模型,利用二维误差分离方法修正扫描深度和角度不同引起的系统误差和安装运动误差,以端点邻域内测量点的高度差异特征识别精确定位工件端点的位置。最后,结合多传感器融合准则,构造出三维位移场测量模型,完成圆柱体工件的长度测量。

2 虚拟测量基准面模型

提出的方法通过对大尺寸工件两端上表面极小部位扫描测量,高效率地获取工件两端上表面的轮廓特征。在虚拟的环境下建立基准面,并使得各个测量点相对于基准面独立存在。为了满足系统实时测量检测需求,基准面采用在线分布测量合成思想,依照扫描目标轮廓逐步建立。虚拟测量基准面可以灵活地适应测量目标几何尺寸要求,更好地适应于实时在线检测。激光扫描测量原理如图1所示。

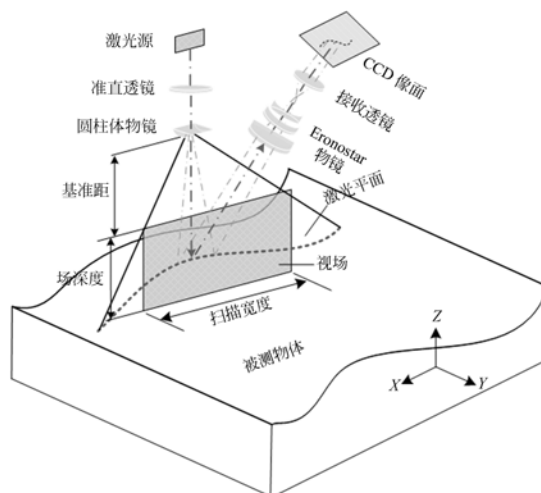


图1 激光扫描测量原理

Fig. 1 Principle of measurement for laser line scanning

本系统对圆柱体工件在虚拟环境下分别建立静态合成的垂直虚拟测量基准面和动态生成的虚拟形状测量基准面,测量模型如图 2 所示。针对单一扫描测量系统坐标,虚拟测量基准面被视为由各个测量虚拟基准线合成,可利用矩阵表达^[9]。假设虚拟基准线下标为 i ,可由一组 7 个向量表示,同时假设垂直虚拟基准线为 P_i 和虚拟形状基准线为 Q_i ,则:

$$P_i = \{x_i, y_i, z_i, p_{0i}, p_{1i}, p_{2i}, p_{3i}\}^T, \quad (1)$$

$$Q_i = \{x_i, y_i, z_i, q_{0i}, q_{1i}, q_{2i}, q_{3i}\}^T. \quad (2)$$

式(1)和式(2)中前 3 个向量为虚拟测量线的基础构造点,在系统中为标定的测量点。第 4 个向量表达为在线虚拟测量线相较于初始虚拟测量线的转换方向。最后 3 个向量设定为在三维坐标系中的 3 个基础方向。

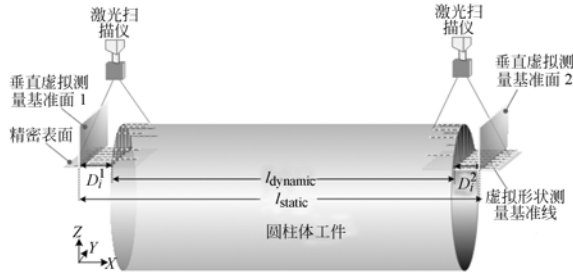


图 2 三维位移场测量模型

Fig. 2 Measurement mode for 3D displacement field

理想情况下,系统在对大尺寸圆柱体工件扫描时,保持扫描线平行,使得虚拟基准线 P_i 和 Q_i 在各自的群体中具有相同基础坐标方向。同时在理想状态下,在线垂直虚拟基准线较初始状态不存在方向转变,即使得 $p_{0i} = p_0 = \{1, 1, 1\}^T$,而虚拟形状基准线存在高度特征的变化,所以垂直虚拟测量基准面是静态构成,虚拟形状测量基准面是动态构成。在本系统中,式(1)和式(2)可以简化为:

$$P_i = \{x_i, y_i, z_i, p_0, p_1, p_2, p_3\}^T, \quad (3)$$

$$Q_i = \{x_i, y_i, z_i, q_0, q_1, q_2, q_3\}^T. \quad (4)$$

针对不同的测量目标,虚拟基准面的大小不同。若假设扫描 n 次完成测量目标轮廓,垂直虚拟测量基准可由垂直虚拟基准线线性合成,其表达为:

$$P = [P_1 \cdots P_i \cdots P_n]^T. \quad (5)$$

同时虚拟形状测量基准面可动态由虚拟形状基准线累加合成,其表达式为:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & Q_n \end{bmatrix}. \quad (6)$$

虚拟测量基准保证了相对于测量点相互独立的关系,能结合测量目标形状不同,自适应生成相应基准,在理论上达到了系统设计的要求。

3 二维误差分离模型

由于其受测量目标的表面质量、扫描相对方位以及扫描深度的影响^[7],激光扫描仪本身的误差评判标准非常困难。同时大尺寸测量时容易受到运动误差影响,而运动误差主要受工件的安装误差等影响^[11]。

由于系统误差主要由激光扫描仪本身误差和工件安置误差引起,根据激光扫描仪相对于被测目标表面的距离 d ,激光平面方向和被测表面的法向量夹角 α_i ,以及工件的轴线偏离了理想的中心线夹角 β_i ,可以构造出系统误差函数:

$$SEF = (d, \alpha_i, \beta_i, e_s, e_m), \quad (7)$$

其中: e_s 为激光扫描仪引起的误差, e_m 为系统运动误差。

若假设对单次扫描工件两端上表面得到的点云轮廓进行建模,则各测量点相对于形状虚拟测量基准线得到的是高度特征函数 $H(x, y, z)$,同时相对于垂直虚拟测量基准面得到的是位移特征函数 $D(x, y, z)$,系统误差函数可以分离为正交的向量 E_H 和 E_D ,如式(8)所示:

$$SEF = E_H + E_D. \quad (8)$$

本系统采用两点序列法^[12-13],分别修正向量 E_H 和 E_D ,从而近似地消除系统误差函数,如图 3 所示。向量 E_H 主要是由于激光扫描仪沿 Z 轴的分辨率所影响,即采集点云的密度多少所决定。在采集点云中,相邻点保持关系 $|E_H(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})| \approx |E_H(x_{ij+1}, y_{ij+1}, z_{ij+1})|$ 。利用相减的两点序列法可近似消除系统误差对高度特征函数的影响。采样密度越大,系统花费的处理时间越多,所以必须协调好点云的密度。向量 E_D 主要受到激光扫描仪在 X 轴方向的分辨率和工件的安装误差影响。由于被测区域相对工件本身是极小的一部分,若在工件轴线相对于理想轴线的偏角 β_i 非常小的情况下,则任意两个相邻测量点相对于垂直虚拟测量基准面存在关系 $|E_D(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})| \approx$

$|\mathbf{E}_D(x_{ij+1}, y_{ij+1}, z_{ij+1})|$ 。利用相减的两点序列法可近似消除系统误差对位移特征函数的影响。

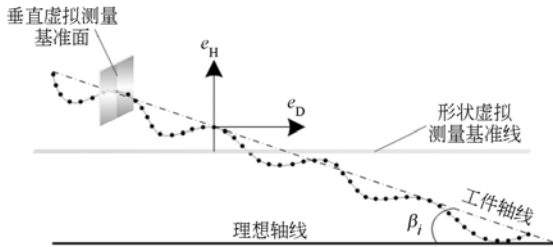


图 3 二维误差分离模型

Fig. 3 2D error separation mode

4 三维位移场模型

4.1 工件端点群定位模型

工件端点群的精确定位是对工件几何尺寸精密测量的关键。在工业制造中,工件加工制造的多样性为工件端面端点定位带来一定的困难^[5]。本系统中根据圆柱体工件端点特定邻域内相邻测量点的高度特征连续变化来识别确定工件端点的位置。首先根据精密平面的特征设立判别阈值,然后在线测量时按照从精密平面开始方向一维查找拐点位置,实时辨别拐点位置并确定其是工件端点,最后标记工件端点位置(图 2)。阈值函数可近似的表达为:

$$f(x_{ia}, y_{ia}, z_{ia}) = \begin{cases} 1 & |\Delta H| > \omega \\ 0 & |\Delta H| \leq \omega \end{cases} \quad (9)$$

其中: $\Delta H = H(x_{ia}, y_{ia}, z_{ia}) - H(x_{ia+1}, y_{ia+1}, z_{ia+1})$, ω 为系统设定阈值。

系统设定阈值需根据在线测量的环境来抑制灰尘、光照噪声等对定位结果的影响。同时按方向的一维查找方式可以更加高效精确地定位到端点位置。

4.2 三维位移场测量

理想状况下,设定工件两端扫描仪的激光光束相互平行,使得各个局部坐标系可以线性移到全局测量坐标系中。如图 2 所示,根据上一节可以得到工件两端上表面端点群位置,从而得出其在相应局部坐标系中到垂直虚拟测量基准面的位移群 D_i^1 和 D_i^2 。根据国际长度测量准则^[1],当位移最小时,得出工件真实长度值,即:

$$\begin{cases} D_{\min}^1 = \min\{D_i^1\} \\ D_{\min}^2 = \min\{D_i^2\} \end{cases}, i=1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

在测量工件前,采用相似形状的圆柱体工件对整个系统进行校准,其长度已由三坐标测量机高精度测量为 l_{standard} 。假若校准工件经系统测量得到最小位移为 $D_{\min}^{c,1}$ 和 $D_{\min}^{c,2}$,则系统校准可得:

$$l_{\text{static}} = l_{\text{standard}} + D_{\min}^{c,1} + D_{\min}^{c,2}. \quad (11)$$

则在线测量的工件动态长度可以表示为:

$$l_{\text{dynamic}} = l_{\text{static}} - (D_{\min}^1 + D_{\min}^2) = l_{\text{standard}} + (D_{\min}^{c,1} + D_{\min}^{c,2}) - (D_{\min}^1 + D_{\min}^2). \quad (12)$$

5 实验与分析

5.1 实验装置

基于三维激光扫描的大尺寸圆柱体工件长度检测系统被利用于实时在线圆柱体工件长度的检测。实验系统如图 4 所示,系统主要由 2 个激光扫描仪,高精度机械导轨,步进电机驱动系统,V 型支撑平台,移动平台,和用于数据处理和显示的计算机组成。

实验测试中,扫描仪选用 KEYENCE 公司的 LJ-G030,其发出条状光束长度为 25 mm,基准距为 20 mm,测量视场深度为 20 mm,深度分辨率为 1 μm ,视场宽度为 25 mm,宽度分辨率为 5 μm ,扫描仪测量触发间隔是 3.8 ms。系统以 VC++6.0 为工作调试软件,运行的计算机为 Intel Core 2 的 2.20GHz CPU 和 2GB RAM。

5.2 实验测试

实验测试前首先采用已由三坐标测量机精密测量的类似形状圆柱体工件对整个系统进行校准。采用长度为 1 000.081 mm,直径为 50.050 mm 圆柱体工件校准确定系统各个参数。

为了对系统的精度和速度测试,选择 3 种典型的圆柱体工件,在恒定室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 进行 10 次连续重复实验。测试结果与三坐标测量机得出标准数据进行对比分析。表 1 显示了工件以 50 mm/s 移动的测量结果。

系统在单次测量时间分为触发时间、采集时间、运行处理时间和显示时间,在上述硬件上共花费大约 50 ms。从表 1 可以看出,测量数据与标准长度相差在 0.050 mm 以内,测量数据的均方根误差位于 0.040 mm 以内,没有变化明显,表明系统的重复性较好。

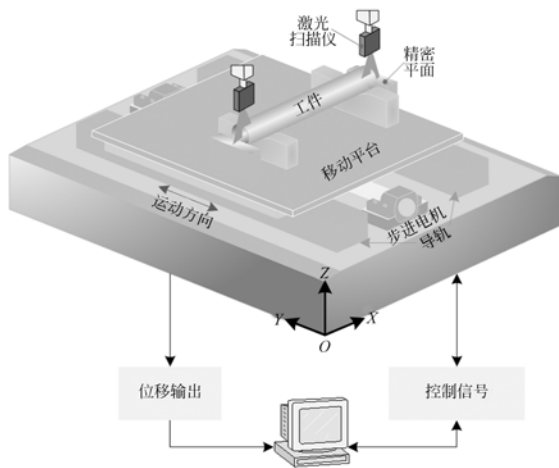


图 4 大尺寸圆柱体工件长度检测系统图

Fig. 4 Length detection system for large scale cylinder

表 1 圆柱体工件长度测量结果

Tab. 1 Measurement results of cylindrical lengths

排次	工件序号		
	A	B	C
1	989.671	1 000.056	1 014.525
2	989.768	1 000.089	1 014.508
3	989.720	1 000.089	1 014.525
4	989.704	1 000.039	1 014.525
5	989.730	1 000.006	1 014.474
6	989.694	1 000.023	1 014.458
7	989.687	1 000.040	1 014.474
8	989.753	1 000.007	1 014.442
9	989.704	1 000.039	1 014.458
10	989.736	1 000.089	1 014.525
标准直径	47.012	50.546	50.040
标准长度	989.729	1 000.062	1 014.492
平均值	989.717	1 000.048	1 014.491
均方根误差	0.033	0.036	0.032

5.3 误差分析

系统测量的误差主要受测量工件表面、系统机械装置、光照噪声、校准工件、测量算法和环境温度等影响。由于实验是在温度和光照不变的情况下测试,所以主要考虑激光扫描仪本身误差、工件安装误差、以及轴方向采样误差。

5.3.1 激光扫描仪误差

激光扫描仪在恒定的温度下,沿轴和轴的分辨率不变。随着系统运行时间延长,激光扫描仪的自身温度提高,工件两端边缘在采集过程中可

能发生边缘效应^[14],使工件边缘端点的位置定位上出现一定误差。为了检测激光扫描仪在温度升高后,对系统测量的影响,首先运行系统长达 2 h,然后在连续的 6 h 内检测校准工件一端端面的一个端点与其相对应的垂直虚拟测量基准面的位移变化趋势,系统每隔 30 min 测量一次。图 5 显示了校准工件一端点与虚拟基准面的位移随时间的变化关系。从图 5 可以观测出系统连续工作 8 h,相对的偏移误差可控制在 10 μm 以内。

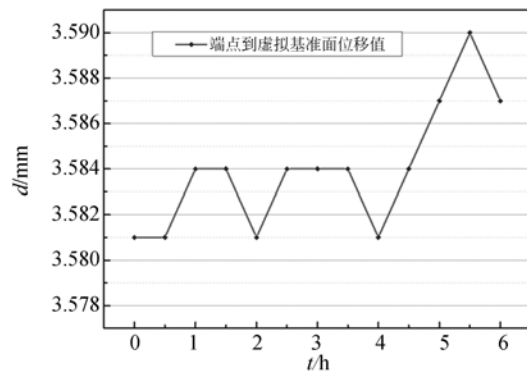


图 5 运行时间对端点到虚拟基准面的位移的影响

Fig. 5 Influence of working time on the displacement between end point and its corresponding virtual datum plane

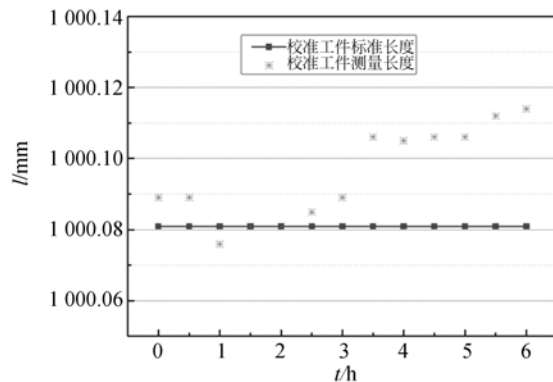


图 6 运行时间对校准工件测量长度的影响

Fig. 6 Influence of working time on length measurement of calibrated workpiece

系统通过测试校准工件长度与系统运行时间的关系,来判断传感器温度升高是否对虚拟基准面间的距离 l_{static} 产生较大的影响。图 6 显示了校准工件以移动速度 50 mm/s 连续 6 h 下的分阶段测量长度的结果。从图 6 可以看出,系统在长时间的运行内,校准工件的测量长度在最后时间段出现了一定的增大,说明虚拟测量基准面间的

距离 l_{static} 相较于初始状态发生了细微的改变。校准工件的测量结果对比于 CMM 的标准测量值,其相对测量误差可控制 $40\ \mu\text{m}$ 以内,仍然满足系统设计的精度要求。

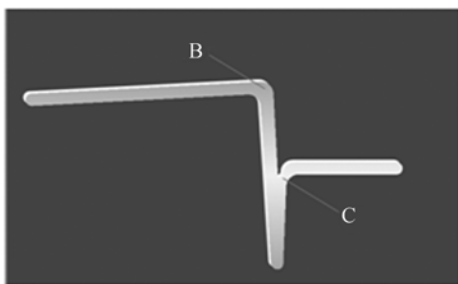
系统在设计中需要尽可能地保证传感器的散热空间,以免在长时间的运行中出现误差增大的现象,必须适当地采用误差补偿的方式。

5.3.2 安装误差

测量工件的主轴线与被测线的延长线不平行时会引起系统的安装误差^[15]。如图 7(a)所示,工件的主轴线与理想的被测线延长线出现微小的夹角 β ,这主要是工件的在线放置、工件的重力、系统外力等产生的。在夹角 β 非常小的情况下,工件两端的对称端点 A 和 B 相较于理想状况下都发生了偏移位移 δ 。而由 4.1 节可知,系统将定位到 C 点取代于端点 B,作为端点 A 的对称端点。假若点 B 和点 C 之间的位移差为 δ_{BC} ,通过式(12)可知,系统所引起的安装误差为 $|\delta - \delta_{BC}|$ 。若在线测量时工件两端的偏移量相同,则系统的安装误差可以完全被消除。



(a)



(b)

图 7 安装误差

Fig. 7 Alignment error

当 β 大于一定范围时,由于激光扫描仪的场深度限定,测量大尺寸直径工件会使 C 点定位出现很大的误差。为了尽可能地减小系统的安装误差,要求工件被在线自动放置到 V 型支撑平台时

尽量靠近工件的 Bessel 点,以消除工件由于安装、重力弯曲等所造成的误差。

5.3.3 Y 轴方向采样误差

在实验中,Y 轴方向采样间隔主要受到工件的移动速度影响。图 8 对不同工件分别在 25 和 50 mm/s 时,10 次重复测量数据进行了分析,可以看出工件移动加快,系统的不确定度增大,这主要是由于速度增大致使轴方向采样间隔增大,工件两端部分关键特征可能会被疏忽而引起系统的不确定度增加。另外,从图 8 可以观测到,工件移动速度在 50 mm/s 以下时,系统的不确定度优于 $\pm 0.050\ \text{mm}$ 。

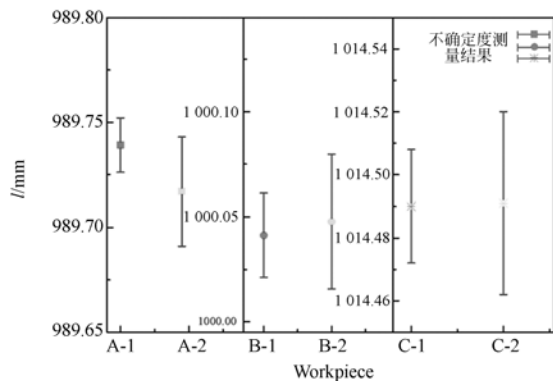


图 8 系统不确定度测量结果比较

Fig. 8 Comparison of measurement results of system uncertainty

6 结 论

本文研制了一种基于三维激光扫描方法的简单、新型、快速的大尺寸圆柱体工件长度在线检测系统。该系统将三维激光扫描高速获取测量目标信息、虚拟环境下建立静态垂直测量基准和动态形状测量基准模型,二维误差分离方法,高度特征识别工件端点技术相结合建立三维位移场测量模型,从而完成圆柱体工件的长度测量。实际测试中,系统分别对处于 $(1\ 000 \pm 25)\ \text{mm}$ 内不同直径的圆柱体工件进行长度测试,与三坐标测量机的高精度测量结果相比,系统可在 1 s 内完成直径为 50 mm 工件长度检测。系统的检测分辨力为 $0.010\ \text{mm}$,检测精度优于 $0.050\ \text{mm}$ 。实际运行结果表明,该设计系统具有高自动性和高效性,很好地满足了在线生产对大尺寸工件控制和长度检

测要求。系统所提出的理论模型也为大尺寸的几何尺寸测量提供了很好的参考。

参考文献:

- [1] DENNIS A S. Length and dimensional measurements at NIST[J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2001, 106(1): 1-23.
- [2] ESTLER W T, EDMUNDSON K L, PEGGS G N, et al.. Large-scale metrology an update [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2002, 51(2): 587-609.
- [3] 张福民, 曲兴华, 叶声华. 大尺寸测量中多传感器的融合[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1237-1240.
ZHANG F M, QU X H, YE SH H. Multiple sensor fusion in large scale measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7):1237-1240. (in Chinese)
- [4] 刘建伟, 梁晋, 梁新合. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 126-134.
LIU J W, LIANG J, LIANG X H. Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 126-134. (In Chinese)
- [5] WECKENMANN A, ESTLER T, PEGGS G, et al.. Probing systems in dimensional metrology [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2004, 53(2): 657-684.
- [6] 袁祖荣, 石照耀, 李岩. 机械制造领域测量技术的发展研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(14):1-11.
QIU Z R, SHI ZH Y, LI Y. Research on the development of measurement technology mechanical manufacture [J]. *Mechanical Engineering*, 2010, 46(14):1-11. (in Chinese)
- [7] LSHEIL A, GONNET J P, JOANNIC D, et al.. Systematic error correction of a 3D laser scanning measurement device [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2011, 49:16-24.
- [8] ZHAO H B, JEAN P K, NICK V G, et al. Automated dimensional inspection planning using the combination of laser scanner and tactile probe [J]. *Measurement*, 2012, 45: 1057-1066.
- [9] MAILHE J, LINARES J M. Geometrical checking by virtual gauge, including measurement uncertainties [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2008, 57: 513-516.
- [10] ZHU SH P, FANG J CH, ZHOU R. A new non-contact flatness measuring system of large 2-D flat workpiece [J]. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 2008, 12(57): 2891-2904.
- [11] JUNG C L, GAO W, YUKI S, et al.. Precision measurement of carriage slide motion error of a drum roll lathe [J]. *Precision Engineering*, 2012, 36: 244-251.
- [12] GAO W, SATO SHI KIYONO. High accuracy profile measurement of a machined surface by the combined method [J]. *Measurement*, 1996, 19(1):55-64.
- [13] EIKI O. Multi-probe method for straightness profile measurement based on least uncertainty propagation (1st report) [J]. *Precision Engineering*, 2010, 34: 49-54.
- [14] NICK V G, STEVEN C, PHILIP B, et al.. A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2009, 47:336-342.
- [15] 刘万里, 曲兴华, 欧阳健飞, 等. 激光跟踪测量系统角度自动校正装置设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(9):1696-1700.
LIU W L, QU X H, OU YANG J F, et al.. Design of angular automatic calibration mechanism for laser tracker system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9):1696-1700. (in Chinese)

作者简介:



周森(1986—),男,江苏徐州人,博士研究生,2008年于南京邮电大学获得学士学位,主要从事仪器测量,机器视觉,智能控制方面的研究。E-mail: zhousen@cqu.edu.cn



郭永彩(1963—),女,重庆人,教授,博士生导师。1982年于西安电子科技大学获得学士学位,1988年、1999年于重庆大学分别获得硕士、博士学位,主要从事以环境和生命科学为应用背景的光电信息技术方面的研究。E-mail: ycguo@cqu.edu.cn