

文章编号 1004-924X(2012)11-2472-07

用于大尺寸工件的动态长度测量系统

周 森*, 郭永彩, 高 潮

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要:针对移动大尺寸工件的表面形貌特点,利用二维激光三角法构造出水平和垂直虚拟测量基准面;结合多传感器融合准则,建立了一种新型的大尺寸工件测量模型,并利用该模型实现了移动工件两端端面到虚拟测量基准面的位移非接触测量。采用误差分离方法自修正理论误差和运动误差的影响;结合人机交互界面,研制了高精度、低成本的移动大尺寸工件长度自动检测系统。利用该系统对在 $(1\ 000\pm 25)$ mm 内以不同速度运动的圆柱体大尺寸工件长度进行检测,得到的检测分辨力为 $10\ \mu\text{m}$ 、检测精度为 $100\ \mu\text{m}$ 、工件移动速度为 $5\ \text{cm/s}$ 。实际运行结果表明,该系统安全、稳定、快速,可满足工业在线生产中对同类型规则的大尺寸工件控制和检测的要求。

关键词:移动大尺寸工件;二维激光三角法;多传感器融合;虚拟测量基准面;长度测量系统

中图分类号: TB92; TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122011.2472

Dynamic length measuring system for large scale workpieces

ZHOU Sen*, GUO Yong-cai, GAO Chao

(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: According to an actual engineering project and dynamic topographic features of moving workpieces, a new measuring model for large scale workpieces was established based on the virtual measurement datum structured by the two-dimensional laser triangle measuring method and the multi-sensor fusion rule. Then, a noncontact, high precision and low cost dynamic length measuring system based on the human-computer interaction was developed by using the error separation method to correct theoretical errors and motion errors. In the experiment, the two probe units were placed on the two sides of moving workpiece, the displacement between both end planes of workpiece and virtual measurement datum was measured simultaneously. Finally, A experimental measurement on the cylinder workpieces $(1\ 000\pm 25)$ mm at different speeds was performed, and results show that the system can offer the resolution less than $10\ \mu\text{m}$, measuring precision over $100\ \mu\text{m}$, and a maximum speed of $5\ \text{cm/s}$. According to the actual operation results, the proposed measurement techniques and measuring system can be well applied to the length detection for similar regular large scale workpieces in industrial production.

收稿日期:2012-06-14;修订日期:2012-07-17.

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

Key words: moving large scale workpiece; 2-D laser triangulation method; multi-sensor fusion; virtual measurement datum; length measurement system

1 引 言

随着先进制造水平的提高,大型几何量测量技术在航天、汽车、船舶及国防工业中起着愈发重要作用^[1-3],机械制造业生产线上的移动大尺寸工件的几何量测量也引起越来越多的关注。目前,常用的大尺寸测量主要分为接触式和非接触式 2 类,接触式测量仪器有千分尺规、三坐标测量机等;非接触式测量方法主要有激光跟踪仪、摄影测量、线激光及结构光等^[4-7]。大尺寸几何量的检测方式正在向高精度、高效率、自动化、软操作化、洁净化方向发展^[3]。激光三角法由于具有测量精度高、响应时间短、实时处理和适应能力强等特点,在工业生产领域的大尺寸工件距离、长度以及三维形貌检测中有广泛的应用^[8-10]。但当工件尺寸超过仪器测量范围,或者无法获取隐藏点信息时,工件的几何特征往往不能被精确测量。而多传感器融合法可以充分融合多测量点的信息,进而可以更好地提高测量精度,这为大尺寸几何量测量提供了新的有效手段^[11]。

本文针对移动大尺寸工件表面形貌特点,利用二维激光三角法构造水平和垂直虚拟测量基准面,先由工件两端的位移传感器和光电传感器组成融合测量模型,再分别测量工件两端动态端面与虚拟测量基准面的位移,最终建立一种新型的动态大尺寸长度智能在线检测系统。该系统结合人机交互界面实现了在线生产中对规则大尺寸工件长度的非接触、快速、无损和精确测量。

2 二维激光系统的构成

2.1 位移传感器工作原理

位移传感器利用二维激光三角原理,可并行测量被测物体在 x 方向和 z 方向的位移变化。如图 1 所示,半导体激光器发出的光束经过准直透镜后,由柱面物镜将其扩大为长度固定的条状光束,随后激光束在被测物体上产生漫反射。反射光先后经由 Ernostar 物镜和接收透镜并聚焦在

光敏检测器上。

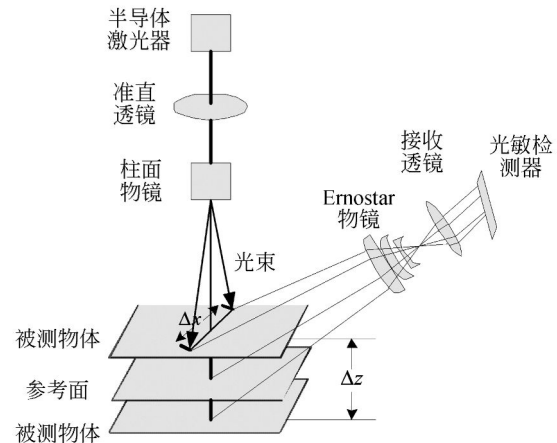


图 1 位移传感器工作原理

Fig. 1 Working principle of displacement sensor

测量时,假设被测物体到参考面的相对位移为 λ ,而在光敏检测器上对应的镜像相对于水平虚拟测量基准面的位移为 λ' , α 为系统比例常数,由 Ernostar 物镜和接收透镜的光学性质决定,则:

$$\alpha = \frac{\lambda'}{\lambda}. \quad (1)$$

在光敏检测器中对移动工件动态表面图像离散化。如图 2 所示,工件以速度 v 沿 y 轴方向匀速移动,工件的上表面轮廓是动态变化的。系统对移动工件 y 轴以 Δ_1 等间隔测量 m 次,对表面图像的测量线沿 x 方向以 Δ_2 等间隔采样 n 次,则

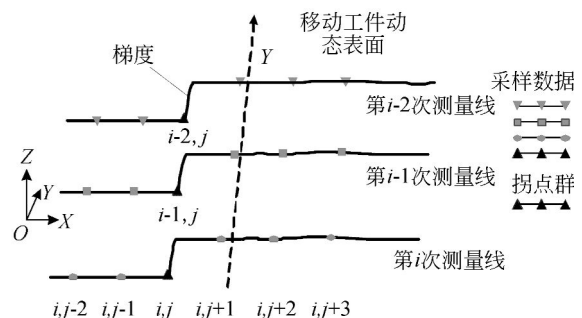


图 2 移动工件动态表面图像离散化

Fig. 2 Image discretization of dynamic surface of moving workpiece

可得系统函数 $f(i, j)$ 与坐标点的表达关系:

$$\begin{cases} f(i, j) - f(i-1, j) = \Delta_1 \\ f(i, j) - f(i, j-1) = \Delta_2 \end{cases} \quad (2)$$

$(i=1, 2, \dots, m \quad j=1, 2, \dots, n)$

假设被测物体上 2 随机点为 p 和 q , 则 2 坐标点沿 z 轴和 x 轴位移的关系函数为:

$$z_{p,q} = \lambda_{z,p} - \lambda_{z,q} = \alpha \cdot (\lambda'_{z,p} - \lambda'_{z,q}) = \alpha \cdot [f_z(p_i, p_j) - f_z(q_i, q_j)], \quad (3)$$

$$x_{p,q} = \lambda_{x,p} - \lambda_{x,q} = \alpha \cdot (\lambda'_{x,p} - \lambda'_{x,q}) = \alpha \cdot [f_x(p_i, p_j) - f_x(q_i, q_j)], \quad (4)$$

式(3)中 $f_z(p_i, p_j)$ 是采样点相对于水平虚拟测量基准面的变化函数, 式(4)中 $f_x(p_i, p_j)$ 是采样点相对于垂直虚拟测量基准面的变化函数。将式(2)代入式(4)可得:

$$x_{p,q} = \alpha \cdot (p_j - q_j) \cdot \Delta_2. \quad (5)$$

2.2 虚拟测量基准面

虚拟测量基准面包含水平虚拟测量基准面和垂直虚拟测量基准面。在实际测量中, 位移传感器被固定在支架上, 使得其在理想状态下发出的激光束位置恒定不变。在系统软件中建立了虚拟测量基准面, 系统设计时, 假定水平和垂直虚拟测量基准面的交线的中心 o 为原点, 设定第一个采样点的 z 轴测量值为 0, 则可得水平虚拟测量基准面的方程为:

$$z = 0. \quad (6)$$

同时在工件表面的被测线上选择第 c 次采样点的位置构造垂直虚拟测量基准面, 即垂直于水

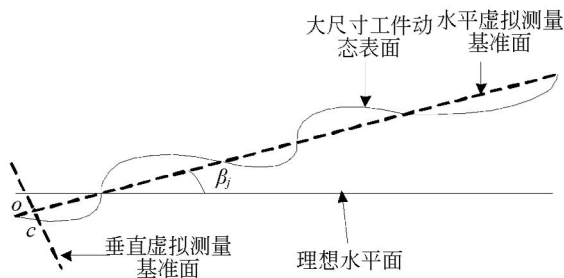


图 3 虚拟测量基准面

Fig. 3 Virtual measurement datum

平测量基准面的 oc 连线, 如图 3 所示, 则可得模型的垂直虚拟测量基准面方程为:

$$x = 0. \quad (7)$$

2.3 误差自修正

系统在测量时, 水平虚拟测量基准面和理想水平面存在夹角, 这会引起理论误差, 工件移动引

起振动和径向跳变等因素会使系统存在运动误差, 如图 3 所示。系统利用误差分离方法对理论误差和运动误差自修正, 并建立系统轮廓以构造函数。由图 2 可知工件表面测量线是等间隔采样, 根据两点序列法^[12]可消除系统在 z 轴方向引起的理论误差和运动误差。假设 z 轴误差为 e_z , 则由式(3)可得出任意 2 个相邻采样点的 z 轴函数表达式为:

$$g_z(i, j-1) = f_z(i, j-1) + e_z, \quad (8)$$

$$g_z(i, j) = f_z(i, j) + e_z, \quad (9)$$

式(9)与式(8)相减可消除 e_z , 令

$$g(i, j) = g_z(i, j) - g_z(i, j-1) = f_z(i, j) - f_z(i, j-1), \quad (10)$$

则得近似轮廓构造函数为:

$$G(i, j) = g(i, j) / \Delta_2 = [f_z(i, j) - f_z(i, j-1)] / \Delta_2, \quad (11)$$

则被测移动工件表面轮廓函数可表达成:

$$I = [G(i, j)]_{m \times n}. \quad (12)$$

3 系统工作原理

3.1 数据融合模型

融合模型由光电传感器和工件两端的位移传感器组成, 位移传感器发出的条状光束与光电传感器发出的光点定位于同一水平线上。光电传感器通过判断接收工件表面反射的光子数来记录工件的运动状态。当工件处于被测状态时, 光电传感器反馈回高电平, 模型输出矩阵为 \mathbf{M} , \mathbf{M} 的元素全为 1; 而当工件处于待测状态时, 光电传感器反馈低电平, 模型输出矩阵 \mathbf{N} , \mathbf{N} 的元素全为 0。

由公式(11)可知工件两端位移传感器的构造轮廓函数 $G_a(i_a, j)$ 和 $G_b(i_b, j)$ 分别为:

$$G_a(i_a, j) = [f_z^a(i_a, j) - f_z^a(i_a, j-1)] / \Delta_2, \quad (13)$$

$$G_b(i_b, j) = [f_z^b(i_b, j) - f_z^b(i_b, j-1)] / \Delta_2, \quad (14)$$

式中 $f_z^a(i_a, j)$ 是工件左端传感器 a 的采样点相对于水平虚拟测量基准面 A 的变化函数; $f_z^b(i_b, j)$ 是其右端传感器 b 的采样点相对于水平虚拟测量基准面 B 的变化函数。模型中工件两端的传感器是相互独立的, 系统建立的虚拟测量基准面不相关, 如图 4 所示, 而理想状态下两端传感器发出的光束定位在同一水平线上, 信号采样同步, 这使

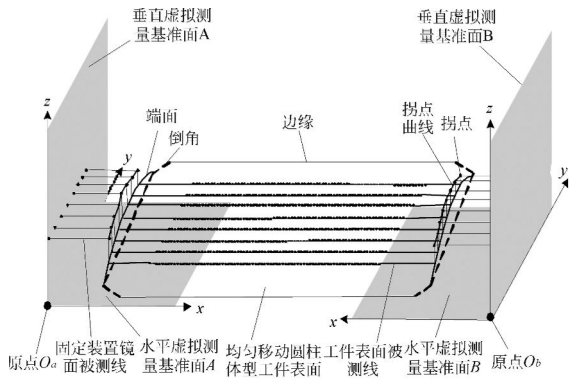


图 4 均匀移动圆柱体工件测量模型

Fig. 4 Workpiece measurement mode of uniformly moving cylinder

得在模型中可对两端激光束拼接,则整个模型的输出表达为:

$$S_{out} = [G_a(i, j), G_b(i, j)]M, \quad (15)$$

$$(i=1, 2, \dots, m \quad j=1, 2, \dots, n)$$

3.2 系统测量原理

工业制造中,由于工件表面常采用各种复杂的曲面,这为工件两端端点的识别带来了一定的困难^[9-12]。系统设计中,工件两端端面与系统固定装置完全接触,固定装置端面高度略高于工件端面高度并将其上表面设计为精密光滑平面,使其相对于工件端面存在明显的拐点,即存在明显的阶跃变化,如图 4 所示。系统处理中,用精密平面的端面拐点代替工件的端面端点,这大大增强了系统的稳定性,并减少了算法的复杂度。

系统需要判断精密平面上拐点的位置,并计算出拐点到垂直虚拟基准面的位移。由于对移动工件的两端动态轮廓共进行 m 次测量,最终需要对多组测量线融合并拼接。本文采用方向查找方式查找拐点,即分别从左向右和从右向左查找传感器 a 和传感器 b 的数据。

系统测量时,在被测轮廓中,拐点的邻域内沿 z 轴突变性较高,拐点位置可被检测到。实验中,第 i 次被测线是一维的,假设拐点邻域长度为奇数 η ,则工件两端端面与精密平台的拐点邻域按方向查找可表达为:

$$k(i, k_a) = G_a(i, k_a + t) - G_a(i, k_a + t + 1) \geq \Delta_a, \quad (16)$$

$$k(i, k_b) = G_b(i, k_b + t + 1) - G_b(i, k_b + t) \geq \Delta_b, \quad (17)$$

$$\left[t \in \left[-\frac{\eta-1}{2}, \frac{\eta-1}{2} \right] \right]$$

其中,式(16)和式(17)中的 Δ_a 和 Δ_b 为拐点动态判别变量,由精密平面拐点的先验条件确定。如图 2 和图 4 所示,系统对均匀移动动态表面连续测量,可得到拐点群 $\{k(i, k_a)\}$ 和 $\{k(i, k_b)\}$, $i=1, \dots, m$,再根据式(5)可得出拐点群到各自垂直虚拟测量基准面的位移。

$$l_a = \alpha \cdot (k_a - m_a) \cdot \Delta_a, \quad (18)$$

$$l_b = \alpha \cdot (k_b - m_b) \cdot \Delta_b. \quad (19)$$

位移传感器在 x 方向的测量范围有限,这使得系统需要根据生产线的实际需求采用不同长度标准工件定标。根据长度测量原理,当 l_a 和 l_b 取值最小值,即为 l_{amin} 和 l_{bmin} ,测量结果为最佳真实值。

假设定标标准工件长度为 l_o ,其对应的最佳拐点到垂直虚拟测量基准面的长度分别为 l_a^o 和 l_b^o ,而测量工件的最佳拐点到垂直虚拟测量基准面的距离为 l_{amin} 和 l_{bmin} ,则可得工件长度为:

$$l = l_o - (l_{amin} + l_{bmin}) + (l_a^o + l_b^o), \quad (20)$$

代入式(18)和式(19)可得:

$$l = l_o - \alpha \cdot [(k_a^i + k_b^i) - (k_a^o + k_b^o)] \cdot \Delta_2. \quad (21)$$

4 测量实验与结果

4.1 实验装置

系统实验装置由运载装置、固定装置、测量装

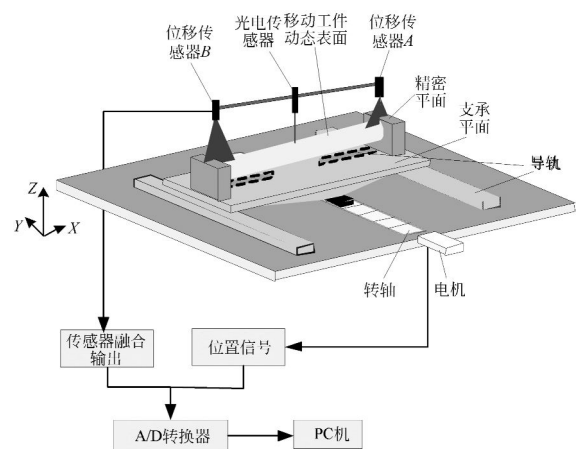


图 5 匀速移动工件长度检测系统图

Fig. 5 Length detection system for uniform moving workpiece

置和控制显示装置组成,如图 5 所示。圆柱体工件((1 000±25)mm)装入支承平台后,由固定装置将其夹紧稳固,控制系统向电机发送信号,电机带动工件匀速向前移动。当工件匀速运动到待测位置时,光电传感器接通并将信号反馈到控制系统,系统触发位移传感器测量工件两端表面和精密平面的轮廓,同时将测量结果进行融合处理并和位置信息一起传送到主系统,系统动态显示对工件长度、移动速度、测量时间。当工件测量完成时,光电传感器断开,系统将工件运输到指定位置放开,整个过程结束。

4.2 实验测试

实验中,选用 KEYENCE 公司的 LJ-G030 位移传感器,它能发出红色条状光束,其测量范围在 x 方向为 ±12.5 mm,分辨率为 5 μm,在 z 方向为 ±10 mm,分辨率为 1 μm,测量触发间隔是 3.8 ms。LJ-G030 的光敏检测器采用 E³-CMOS 影像传感器,可在 x 及 z 方向上精确跟踪物体的表面轮廓^[8]。为了对系统的精度和速度测试,实验中设计两种情况:第一种情况,工件移动速度 $v=20$ mm/s,首先用标准棒(经计量局检定)定标,然后对不同长度相同规格的圆柱体工件分类测量。第二种情况,工件的移动速度 $v=40$ mm/s,采用相同的标准棒定标,对比不同圆柱体工件测量结果。设定系统 2 条测量线的时间间隔 $\Delta t=50$ ms,由 $\Delta_1 = v \times \Delta t$,则第一种情况下沿 y 轴采样间隔 Δ_1

$=1$ mm,同样可得第二种情况的采样间隔 $\Delta_1 = 2$ mm。

(1)第一种情况 工件移动速度为 20 mm/s,选取定标准棒长度为 1 000.050 mm,可得系统的测量范围为(1 000.050±25)mm。系统对 6 种不同长度的圆柱体工件待测工件的直径为 20~30 mm,随机连续重复测量,测量结果见表 1。

表 1 为各排次标准工件的测量结果,工件移动速度为 20 mm/s 时,其测量值均在各组的标准长度±100 μm 之内,满足系统的设计精度要求。同时,测量不同工件时的均方根误差并没有明显变化,证明系统的重复性很好。

(2)第二种情况 测量结果如表 2 所示,增大动态工件的移动速度,这使得沿 y 方向的测量线间隔 Δ_1 增大,对比表 1 可知测量值的均方根误差波动变大,即系统的稳定性降低,但系统测量精度仍满足设计要求。这说明在一定的速度范围内,系统精度可满足实际检测需要,而随着工件移动速度的增大,系统的不确定性升高。

现场测试得到,当工件速度设定范围为 10~50 mm/s 时,系统精度和稳定性可以达到实际生产要求。另外通过调整位移传感器的位置,采用不同长度的标准棒定标时,装置能准确地测量长度为 500~1 000 mm 的圆柱体工件。另外,系统还具有可动态显示状态参数和测量结果,长度超出测量范围报警以及装置安全保护等功能。

表 1 以 20 mm/s 匀速运动的工件长度测量结果

Tab.1 Measurement results of workpiece length at the uniform speed of 20 mm/s (mm)

排次	工件序号	标准长度			测量值			平均值	均方根误差
1	A1	986.908	986.858	986.891	986.924	986.907	986.906	986.897	0.025
2	A2	986.068	986.056	986.089	986.089	986.105	986.089	986.086	0.026
3	B1	995.492	995.475	995.458	995.508	995.475	995.491	995.481	0.020
4	B2	1000.075	1000.056	1000.023	1000.055	1000.006	1000.055	1000.039	0.042
5	C1	1013.065	1013.090	1013.073	1013.073	1013.047	1013.056	1013.068	0.015
6	C2	1016.730	1016.785	1016.736	1016.769	1016.750	1016.768	1016.762	0.036

表 2 以 40 mm/s 匀速运动的工件长度测量结果

Tab.2 Measurement results of workpiece length at the uniform speed of 40 mm/s (mm)

排次	工件序号	标准长度			测量值			平均值	均方根误差
1	A1	986.908	986.858	986.841	986.858	986.858	986.825	986.848	0.061
2	B1	995.492	995.474	995.525	995.508	995.442	995.458	995.481	0.033
3	C1	1013.065	1013.096	1013.039	1013.090	1013.047	1013.073	1013.049	0.023

4.3 误差分析

系统误差主要由位移传感器误差、工件定位误差、工件材料和环境误差组成。

4.3.1 位移传感器误差

位移传感器在 x 方向的分辨率 Δ_2 为 $5 \mu\text{m}$, 两端位移传感器能引起的最大系统误差为 $10 \mu\text{m}$; 在 z 方向的分辨率 Δ_1 为 $1 \mu\text{m}$, 而根据系统构造二维测量空间, 由式(10)可知, 传感器出现轻微倾斜或引起工件沿 z 方向细微振动, 并不会引起测量误差。位移传感器引起的测量误差为 $\delta_1 = 2 \times \Delta_2$ 。

4.3.2 定位误差

定位误差是由对准误差和系统测量的不同步引起的。系统同步误差是由系统接收位置信号和发出触发测量信号的时间差决定的, 系统同步误差使得工件表面实际测量线与理想测量线在 y 方向出现偏移, 由于时间差固定, 系统同步误差与工件移动速度大小成正比。根据式(12)可知, 在限定的速度范围内, 二维测量空间中系统同步误差对系统

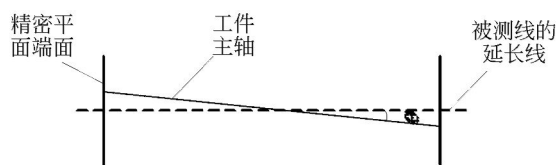


图 6 对准误差
Fig. 6 Alignment error

长度测量影响较小。工件对准误差是指工件主轴线与被测线的延长线不平行^[13], 出现了微小的夹角 θ (图 6), 主要由工件的安装夹紧、重力、热梯度等引起的。假设工件的实际长度为 l , 则引起的对

准误差为:

$$\delta_2 = l - l \cdot \cos\theta = 2l \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2} = l \cdot \theta^2 / 2. \quad (22)$$

4.3.3 工件材料和环境误差

标准棒检定的误差, 系统定标的温度与工件测量时温度差异以及标准棒的材料和测量工件的材料不同, 都会引起系统的测量误差 δ_3 。环境误差主要受到现场的温度、气压、湿度、空气净化程度等的影响^[12]。现场系统设备在室内环境下运行, 室内温度湿度恒定, 空气流动慢, 尘埃较少, 所以环境对测量系统产生的影响较小。

将上述误差分量进行合成, 则可得系统的总体误差为:

$$\delta = \pm \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2}. \quad (23)$$

5 结 论

本文描述了一种新型的大尺寸移动工件长度在线高精度智能检测技术。该技术将二维激光三角法、信息融合和误差分离法相结合, 建立了水平和垂直虚拟测量基准面, 并通过检测工件两端动态端面到虚拟基准面的位移, 得出工件的长度。实际测试中, 系统对长度范围在 $(1\ 000 \pm 25)\text{mm}$ 的圆柱体工件以不同移动速度进行测量, 检测精度和效果较好地满足工业生产的要求, 检测的分辨率可以达到 $10 \mu\text{m}$ 、检测精度为 $100 \mu\text{m}$, 工件移动速度可达 50mm/s 。实验证明, 该方法适用于长度为 $500 \sim 1\ 000 \text{mm}$ 的规则体工件的高精度测量。本文的工作为移动工件的几何尺寸检测提供了很好的参考。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] PEGGS G N, MAROPOULOS P G, HUGHES E B, et al.. Recent developments in large-scale dimensional metrology [C]. *Pro. IME B J. Eng. Manufacture*, 2009, 223(B6): 571-595.
- [3] 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.
- [4] 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)
- [5] ZHANG ZH F, FENG Q R, GAO ZH, et al.. A new laser displacement sensor based on triangulation for gauge real-time measurement [J]. *Optics & Technology*, 2008, 40(2): 252-255.
- [6] OSAWAS, TAKAT S J T, HONG J. et al.. Evaluation of the performance of a novel laser tracker used for coordinate measurements [J]. *SPIE*, 2001, 4401: 127-135.

- [6] 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 workpieces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 126-134. (in Chinese)
- [7] 程真英,费业泰,陈晓怀. 动态测量系统均匀设计理论研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(8): 893-896.
CHENG ZH Y, FEI Y T, CHEN X H. Research on uniform design theory for dynamic measurement systems [J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2008, 19(8): 893-896. (in Chinese)
- [8] NG T W. The optical mouse as a two-dimensional displacement sensor [J]. *Sensors and Actuators*, 2003, 10(1): 21-25.
- [9] BRADSHAW G. *Non-contact Surface Geometry Measurement Techniques* [M]. Dublin: Trinity College Press, 1998.
- [10] LOTZE W. Precision length measurement by computer-aided coordinate measurement [J]. *Instrument Science and Technology*, 1986, 19(2): 495-500.
- [11] 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)
- [12] GAO W, KIYONO S S. High accuracy profile measurement of a machined surface by the combined method [J]. *Measurement*, 1996, 19(1): 55-64.
- [13] 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,智能控制等方面的研究。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的研究工作。E-mail: ycguo@cqu.edu.cn



高 潮(1959—),男,山西柳林人,教授,博士生导师,1982年于东南大学获得学士学位,1988年、2004年于重庆大学分别获得硕士、博士学位,主要从事信息处理技术、测控技术与仪器等方面的研究工作。E-mail: gaoc@cqu.edu.cn