

## 微细管道内壁缺陷柔性在线测量技术研究

吴 斌,邢秀奎,张云昊

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

**摘 要:** 采用新型特殊设计的光学传输部件,将外部照明光源导入待测管道内部,同时将管道内壁图像导出,突破了传感器内置的传统工作模式,实现了测量传感器外置,满足了微细管道管内空间狭小的应用需求。同时,结合工业机器人运动平台,进一步构建了柔性在线测量系统,满足了不同工件中不同位姿分布的微细管道柔性测量需要。根据应用要求,首先在前期研究工作分析的基础上,完善了测量系统方案设计;对系统工作流程及核心问题进行了分析,并针对系统构建中的对准问题进行了重点研究,提出了一种新颖、合理的对准方法;基于构建的测量系统,针对 10 mm 孔径管道内壁上 0.6 mm、1.0 mm 和 2.0 mm 的模拟圆孔缺陷进行了测量实验。实验结果表明,三种缺陷测量结果的标准差均小于 0.01 mm,可以实现微细管道内壁缺陷的柔性、在线测量。

**关键词:** 微细管道; 内壁缺陷测量; 光学传输部件; 姿态调整; 视觉测量

**中图分类号:** TH878 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-2944-08

## Flexible in-line measurement technology for surface defects of small bores

Wu Bin, Xing Xiukui, Zhang Yunhao

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** To fulfill the need of measurement on the small bore's interior features, a specially designed optical transmission component was adopted to divert exterior illumination into the interior of small bores and to export the interior image. This study surpassed the traditional mode and achieved the exterior placement of the measurement sensors to make it possible for the measurement in narrow space. To fulfill the need of measurement on small bores in different position and direction, a new flexible in-line measurement system was set up utilizing the movement platform of industrial robots. Firstly, the design of the measurement system was proposed based on analysis of preliminary method, and the flow of the work was given. Then, the question of alignment between sensor and sample was analyzed in detail, and a novel, reasonable method of aligning was given. Based on the system, the measuring experiment was carried out on 0.6 mm, 1.0 mm and 2.0 mm simulated defect points on interior wall of 10 mm diameter bore, the standard deviation is all less than 0.01 mm. The experimental result shows that the system is valid and able to accomplish the feasible, on-line measurement.

**Key words:** small bore; interior defect measurement; optical transmission component; posture adjustment; visual measurement

收稿日期:2015-02-15; 修订日期:2015-03-19

基金项目:国家自然科学基金(61172120);天津市自然科学基金重点基金(13JCZDJC34800)

作者简介:吴斌(1975-),男,副教授,硕士生导师,博士,主要从事工业视觉检测、大尺寸数字化测量及图像处理技术等方面的研究。

Email: wubin@tju.edu.cn

## 0 引言

随着先进制造业和科学技术的发展,微细管道或小尺寸特征内孔在航空航天、汽车、能源及化工等领域中的应用越来越广泛,在微细管道的精密铸造过程中,由于灰尘或气隙的存在,其内壁表面常常会产生一些微小的凹坑、气室等缺陷,经后续机加工或经过长期使用,也可能使内部的微小气室暴露形成小凹坑或出现裂纹、划痕等缺陷,从而引起部件内部尤其是连接处高压气体或液体的泄漏,造成设备性能的降低,甚至酿成安全事故。因此,如何准确、快速、在线、自动地实现小尺寸特征内孔或微细管道管内凹坑、裂纹、划痕等缺陷及形貌测量已成为现代工业制造及质量控制中亟待解决的问题。

近几十年来,针对微细孔内表面的缺陷和形貌检测,许多学者相继开展了大量的相关研究。如 Golinelli G 等<sup>[1]</sup>采用气动塞规法实现了管内径尺寸的测量,尤其是配合进给机构可实现自动、在线测量,但无法实现管道内表面的形貌及缺陷检测; Shcherbinin V 等<sup>[2-4]</sup>采用涡流法和超声法进行了管内壁的缺陷检测,但测量空间分辨率较差,而且超声法需要耦合剂配合; Mizunuma M 等<sup>[5]</sup>基于三角测量原理采用单点结构光扫描的方式实现了 20~60 mm 管道内壁的形貌测量,冷惠文等<sup>[6-8]</sup>采用激光光源和锥面反射镜构建了圆形结构光,结合光学三角法逐截面扫描构建了管道内壁的三维形貌。但上述测量方法大都针对内径尺寸大于 10 mm 的管道或特征内孔,而对于 10 mm 或更小尺寸内径特征孔或微细管道的检测方法较少,且存在一个共同的特点,即测量过程中传感器必须进入待测管道。虽然可以采用器件的微型化设计减小传感器的尺寸,但由于传感器组成部件多、结构复杂,因此传感器的小型化难度很大。而且,随着现代工业和科学技术的进一步发展,待测管道或内孔将进一步小型化、微型化,上述方法的应用面临着物理上的瓶颈。

Hong E<sup>[9]</sup>和 Wu B 等<sup>[10-11]</sup>突破了传感器内置的传统工作模式,采用新型特殊设计的光学传输部件(视像管,其前端为 360°锥镜全景成像),将外部照明光源导入待测管道内部,同时将管道内壁图像导出,如图 1 所示,实现了测量传感器外置,满足了微细管

道管内空间狭小的应用需求。

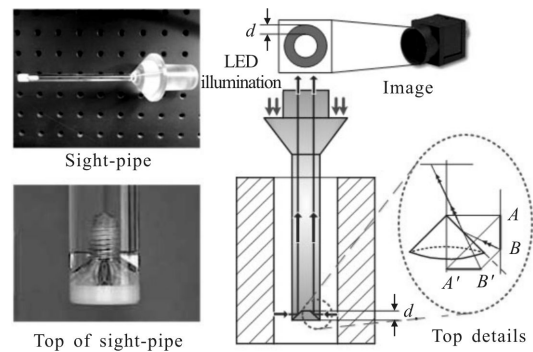


图 1 视像管结构及成像原理

Fig.1 Sight-pipe structure and imaging principle

## 1 柔性测量系统方案设计

基于视像管、照明光源和摄像机,结合电控平移台、旋转台和俯仰台等调整机构可实现特定的微细管道管内缺陷的自动测量,但无法满足不同工件中不同姿态微细管道的测量应用需求。

### 1.1 初步方案分析

若引入工业机器人作为运动平台,可将视像管、照明光源和摄像机等测量单元直接安装在机器人的末端关节法兰盘上,通过机器人多轴转动配合,以实现曲尺状运动,在其可达范围内实现柔性测量,如图 2 所示。在进行管内缺陷测量时,视像管应沿管道轴向作直线移动,作曲尺运动的机器人驱动视像管既可匀速移动,也可步进移动。若视像管匀速移动,摄像机帧频为 10 frame/s,为避免产生图像拖尾现象,则机器人曲尺运动速度应为 1 mm/s 左右;若驱动视像管步进移动,根据视像管成像有效区域分析,其步长应为 0.01 mm 左右。

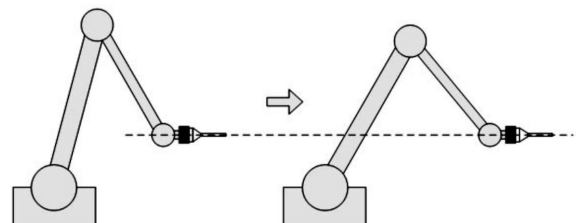


图 2 曲尺状运动示意图

Fig.2 Schematic diagram of square shaped movement

然而,工业机器人作为运动平台,其运动和定位精度较低。以 ABB IRB2400 型工业机器人为例,其

最小步进距为 0.1 mm, 无法满足视像管步进移动测量的要求。而且, 由机器人逆运动学<sup>[12]</sup>可知, 其关节转动角速度与末端法兰盘坐标系的线速度关系非常复杂, 通过控制关节转动角速度所实现的直线运动, 其线速度难以恒定。由此可见, 直接将测量单元固定于机器人末端法兰盘的简单组合方式无法满足应用要求。

### 1.2 系统总体方案设计

由前述研究可知, 电控位移台具有良好的直线运动特性, 且可实现稳定的匀速运动和小步进距移动, 因此, 通过电控位移台将测量单元和工业机器人集成起来, 既可以利用机器人运动平台的灵活性, 实现柔性测量, 又可以充分发挥电控位移台的精确移动性能, 满足微细管道测量需要。系统方案如图 3 所示。

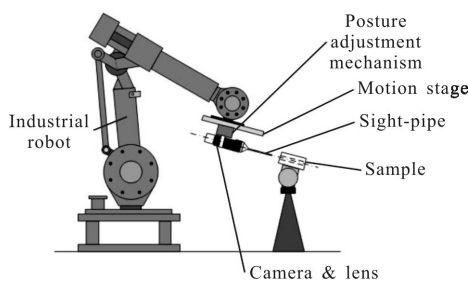


图 3 系统总体方案示意图

Fig.3 Structure of system

其中, 运动平台为 ABB IRB2400 型工业机器人, 其运动半径 1.5 m, 承重能力为 12 kg。电控位移台为 Zolix 公司的 KSA150-11-X 型直线位移台, 该位移台外置光栅尺, 结合闭环控制, 即可实现匀速运动, 又可进行步进移动, 其步进分辨率为 1  $\mu\text{m}$ , 重复定位精度小于 3  $\mu\text{m}$ , 运动的直线度优于 10  $\mu\text{m}$ 。

此外, 为实现系统精密调整, 还需要旋转台、倾斜台等机械调整装置。

### 1.3 系统工作流程

首先, 根据待测管道的位姿, 示教工业机器人, 使视像管进入待测管道测量起始位置, 并使之中心轴线与待测管道同轴; 然后, 位移台以步进的方式驱动视像管进入待测管道, 摄像机同步采集管壁图像; 或为进一步提高测量效率, 位移台驱动视像管做匀速运动, 摄像机以适当的帧率采集管壁图像; 最后, 将采集的管壁全景图像进行有效环形区域图像提取、环形图像展开、条状图像拼接, 最后得到管道内

壁的完整图像, 进行缺陷识别、定位和测量。

## 2 视像管与待测管道的对准

### 2.1 非对准误差分析

由系统工作流程可以看出, 视像管与待测管道的姿态关系, 即视像管与被测管道的对准关系至关重要, 直接决定着管壁的成像及基于图像的缺陷检测精度, 甚至影响系统的正常测量过程。邵震宇<sup>[12]</sup>对这个问题进行了研究。图 4(a)所示为视像管与待测管道轴线理想对准时的截面示意图, 视像管与待测管道截面圆心重合, 均用  $O_1$  表示。图 4(b)所示为实际测量非对准时的截面示意图, 待测管道和视像管截面圆心分别由  $O_1$  和  $O_2$  表示, 且两圆心偏差为  $x$ 。

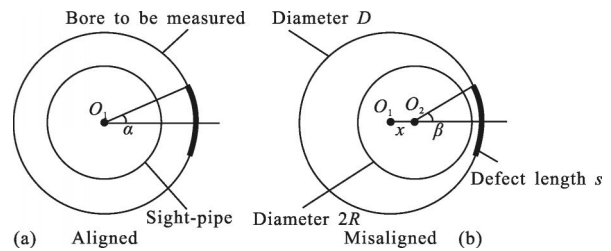


图 4 对准与非对准时的视像管截面图

Fig.4 Sectional view of the aligned and misaligned system

则非对准时缺陷特征尺寸变化率  $k$  与待测管道和视像管截面圆心偏差  $x$  间, 存在着一定的数量关系: 以 10 mm 待测管道为例, 若视像管直径设计为 7 mm, 欲实现 1 mm 大小的缺陷测量, 其缺陷特征尺寸变化率与非对准圆心偏差的关系曲线如图 5 所示。

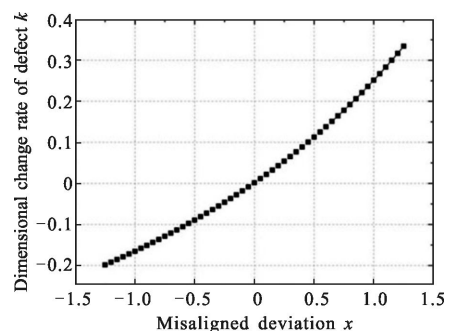


图 5 缺陷特征尺寸变化率与非对准圆心偏差的关系曲线

Fig.5 Elations between misaligned deviation and dimensional change rate

由关系曲线可知, 当非对准偏差为 1.0 mm 时, 缺陷特征尺寸变化率为 0.25, 也就是说此时单由非

对准因素所产生的缺陷尺寸测量相对误差即达到 25%。可见系统建立时,视像管与待测管道的对准对于实现高精度管内缺陷测量至关重要。

此外,这种非对准因素也会影响缺陷特征成像的大小。成像变化率与非对准圆心偏差近似呈正比关系,当非对准偏差为 1.0 mm 时,存在 1.04% 的成像尺寸变化率。

综上所述,视像管与被测管道非对准将引入相应的测量误差,尤其是偏差过大时,还可能会损坏视像管等测量单元。因此,视像管与被测管道的对准调整至关重要。

## 2.2 对准调整方法

根据系统总体方案和测量流程,实现测量过程中视像管与被测管道的实时精确对准,需要以下两个步骤,如图 6 所示。

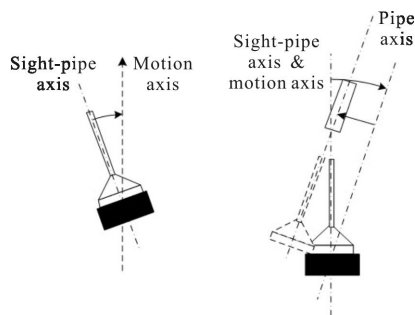


图 6 对准步骤

Fig.6 Procedure of alignment

- (1) 使视像管中心轴线与位移台运动方向平行;
- (2) 使视像管与待测管道中心轴线重合。

Hong E 等针对视像管与被测管道的对准调整开展了研究。其方法优点在于无需额外的设备,调整速度快。但也存在一定的缺陷:

(1) 上述方法中,需要拆卸视像管。然而由于视像管、镜头、相机连接存在同轴度误差,视像管本身存在几何误差,当视像管被重新安装时,其轴线可能已经与之前不同,从而引起一定的偏差。进行了相关实验(表 1):将视像管拆卸并重新安装,多次重复这个动作,并用激光跟踪仪拟合每一次的视像管轴线方向。可以看出,由于几何误差存在,这些方向均不相同,这将给对准造成一定的误差。

(2) 要实现在线测量,工件的位置和角度可能难以任意调整。所以尽可能不调整待测件,依靠调整测

量系统来实现对中。

表 1 轴线偏差测量结果

Tab.1 Axis deviation measurement results

Axis	1 and 2	2 and 3	3 and 4
Angle/rad	0.029	0.026	0.033
Angle/(°)	1.718	1.472	1.903

故文中提出一种新的方法,拟达到在不拆卸视像管、不调整待测件的条件下,实现视像管与待测件的精确对中的目的。

## 2.3 姿态调整系统搭建方案

使用激光跟踪仪(文中使用 Leica 公司的 AT901)对视像管轴线、待测管道以及平移台运行方向进行采点拟合,分别得到它们的方向向量,计算它们的偏角、距离并用机器人末端的姿态调整系统进行校正。姿态调整系统如图 7 所示,其中,手动旋转、俯仰台用来调整视像管轴线与其运动方向的角度关系;机器人第 5、第 6 轴用来调整视像管与待测件轴线的角度关系;用手动平移、升降台来调整视像管与待测件轴线之间的平移关系。

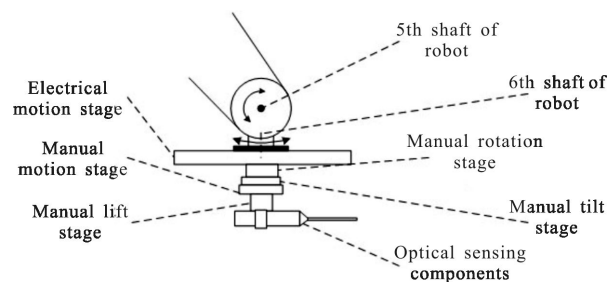


图 7 调整系统结构图

Fig.7 Structure of adjusting system

其中,角位移台调整范围 $\pm 10^\circ$ ,最小读数 $5^\circ$ ;旋转台粗调范围 $360^\circ$ ,微调范围 $\pm 10^\circ$ ,最小读数 $2^\circ$ ;升降台行程 5 mm,精度 0.003 mm;平移台负载 7 kg,行程 25 mm,最小读数 0.01 mm;机器人第 5、第 6 轴的精度能够达到 $0.1^\circ$ 。

文中实验采点使用 AT901 跟踪仪自带的 T-Probe 工具(如图 8 所示),该工具具有无臂、无线、体积小等特点,可以快速地对难测量点进行定位测量。



图 8 用 T-Probe 进行点采集  
Fig.8 Point acquisition using T-Probe

2.4 具体调整方案第一步:调整视像管轴线与运动方向平行

2.4.1 相关定义

如图 9 所示, 约定激光跟踪仪测量坐标系为  $O_0-X_0Y_0Z_0$ (竖直向上为  $Z_0$  轴, 鸟巢方向为  $Y_0$  轴, 通过右手关系确定  $X_0$  轴); 平移台坐标系为  $O_1-X_1Y_1Z_1$ 。在平移台运动方向上用跟踪仪采取若干点, 拟合直线, 其方向向量即为  $X_1$  轴在  $O_0$  坐标系下的方向向量  $\vec{i}_1=(x_{x_1-o_0}, y_{x_1-o_0}, z_{x_1-o_0})$ ; 采取若干点, 拟合平移台的连接端面, 其方向向量为  $Z_1$  轴在  $O_0$  坐标系下的方向向量  $\vec{k}_1=(x_{z_1-o_0}, y_{z_1-o_0}, z_{z_1-o_0})$ ;  $Y_1$  方向由两轴叉乘得到  $\vec{j}_1=\vec{k}_1 \times \vec{i}_1$ , 用跟踪仪探头采点拟合视像管轴线, 得到其方向向量为  $\vec{s}$ 。

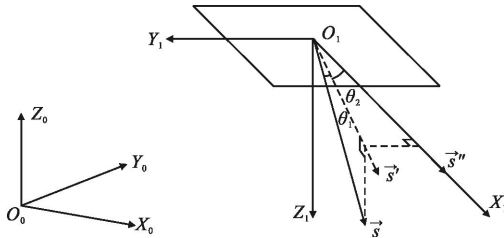


图 9 第一步对准中的坐标系  
Fig.9 Coordinate system in the alignment (first step)

设  $\vec{s}$  在坐标系  $O_1-X_1Y_1Z_1$  下的坐标为:

$$\vec{s}=(x_{s-o_1}, y_{s-o_1}, z_{s-o_1}) \quad (1)$$

方向余弦为:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_{s-o_1} &= \frac{\vec{s} \cdot \vec{i}_1}{|\vec{s}| \cdot |\vec{i}_1|}, \cos \beta_{s-o_1} = \frac{\vec{s} \cdot \vec{j}_1}{|\vec{s}| \cdot |\vec{j}_1|}, \\ \cos \gamma_{s-o_1} &= \frac{\vec{s} \cdot \vec{k}_1}{|\vec{s}| \cdot |\vec{k}_1|} \end{aligned} \quad (2)$$

在上述定义下, 该步即为: 通过俯仰台和旋转台, 调整  $\vec{s}$  方向, 使其与  $X_1$  方向相同。

2.4.2 调整方法

先将  $\vec{s}$  绕  $Y_1$  轴旋转  $\theta_1$  角, 得到  $\vec{s}'$ , 使其落在  $Y_1-X_1$  平面上。再将  $\vec{s}'$  绕  $Z_1$  轴旋转  $\theta_2$  角, 得到  $\vec{s}''$  与  $X_1$  重合, 第一步调整完成。其中:

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \gamma_{s-o_1} = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{\vec{s} \cdot \vec{k}_1}{|\vec{s}| \cdot |\vec{k}_1|} \quad (3)$$

$$\theta_2 = \arctan \frac{y_{s-o_1}}{x_{s-o_1}} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \therefore \cos \alpha_{s-o_1} &= \frac{\vec{s} \cdot \vec{i}_1}{|\vec{s}| \cdot |\vec{i}_1|} = \frac{x_{s-o_1}}{|\vec{s}|}, \\ \cos \beta_{s-o_1} &= \frac{\vec{s} \cdot \vec{j}_1}{|\vec{s}| \cdot |\vec{j}_1|} = \frac{y_{s-o_1}}{|\vec{s}|} \\ \therefore \theta_2 &= \arctan \frac{\vec{s} \cdot \vec{j}_1}{\vec{s} \cdot \vec{i}_1} \end{aligned} \quad (5)$$

2.5 具体调整方案第二步:调整视像管轴线与待测管轴线重合

2.5.1 相关定义

如图 10 所示, 用激光跟踪仪在待测孔内壁取点拟合, 得到待测管轴线的方向向量  $\vec{p}=(x_{p-o_0}, y_{p-o_0}, z_{p-o_0})$ , 并获得其轴线上任意一点  $P_R(x_{p_r-o_0}, y_{p_r-o_0}, z_{p_r-o_0})$  则其轴线  $p$  在空间中的方程则可表示为  $p(\vec{p}, P_R)$ 。

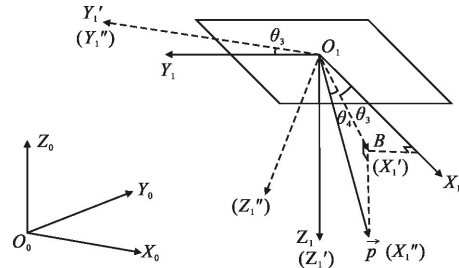


图 10 第二步对准中的坐标系  
Fig.10 Coordinate system in the alignment(second step)

方向向量  $\vec{p}$  在坐标系  $O_1-X_1Y_1Z_1$  下的坐标为:

$$\vec{p}=(x_{p-o_1}, y_{p-o_1}, z_{p-o_1}) \quad (6)$$

方向余弦为:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_{p-o_1} &= \frac{\vec{p} \cdot \vec{i}_1}{|\vec{p}| \cdot |\vec{i}_1|}, \cos \beta_{p-o_1} = \frac{\vec{p} \cdot \vec{j}_1}{|\vec{p}| \cdot |\vec{j}_1|}, \\ \cos \gamma_{p-o_1} &= \frac{\vec{p} \cdot \vec{k}_1}{|\vec{p}| \cdot |\vec{k}_1|} \end{aligned} \quad (7)$$

在上述定义下, 该步即为: 先旋转坐标系  $O_1-X_1Y_1Z_1$ , 使旋转后的  $X_1$  轴与  $\vec{p}$  平行(由机器人末端两轴

完成),再平移该坐标系,使其与直线  $p$  重合(用平移台上搭载的手动平移、升降台完成)。

2.5.2 调整角度、调整距离的计算方法

先将  $O_1-X_1Y_1Z_1$  绕  $Z_1$  轴旋转  $\theta_3$  角,使  $X_1'$  方向与  $\vec{p}$  在平面  $X_1-Y_1$  上的投影重合,得到坐标系  $O_1'-X_1'Y_1'Z_1'$ 。再将  $O_1'-X_1'Y_1'Z_1'$  绕  $Y_1'$  轴旋转  $\theta_4$  角,得到新坐标系  $O_1''-X_1''Y_1''Z_1''$ ,使得  $X_1''$  轴方向与  $\vec{p}$  重合。其中:

$$\theta_3 = \arctan \frac{y_{p-O_1}}{x_{p-O_1}} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \therefore \cos \alpha_{p-O_1} &= \frac{\vec{p} \cdot \vec{i}_1}{|\vec{p}| \cdot |\vec{i}_1|} = \frac{x_{p-O_1}}{|\vec{p}|}, \\ \cos \beta_{p-O_1} &= \frac{\vec{p} \cdot \vec{j}_1}{|\vec{p}| \cdot |\vec{j}_1|} = \frac{y_{p-O_1}}{|\vec{p}|}, \\ \therefore \theta_4 &= \arctan \frac{\vec{p} \cdot \vec{j}_1}{\vec{p} \cdot \vec{i}_1} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\theta_4 = \frac{\pi}{2} - \gamma_{p-O_1} = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{\vec{p} \cdot \vec{k}_1}{|\vec{p}| \cdot |\vec{k}_1|} \quad (10)$$

调整完角度后,重新计算坐标系方向向量,如图 11 所示,得到  $Z_1''$  方向  $\vec{k}''$ ,则  $\vec{j}'' = \vec{k}'' \times \vec{x}'' = \vec{k}'' \times \vec{p}''$ 。重新拟合视像管轴线,得到其轴线上任意一点  $R_s(x_{R_s}, y_{R_s}, z_{R_s})$ ,与  $\vec{k}''$  和  $\vec{j}''$  共同构造直线  $Y_1''$  与  $Z_1''$ 。用下式求直线  $\vec{p}$  与  $Y_1''$ 、 $Z_1''$  的空间最近距离  $d_y$ 、 $d_z$ ,即为手动升降台及平移台所要移动的距离:

$$\begin{aligned} d_y &= |\vec{d}_{Ry}| \cdot \frac{|\vec{d}_{Ry} \cdot (\vec{j}_1'' \times \vec{p}'')|}{|\vec{d}_{Ry}| \cdot |\vec{j}_1'' \times \vec{p}''|} \\ d_z &= |\vec{d}_{Rz}| \cdot \frac{|\vec{d}_{Rz} \cdot (\vec{k}_1'' \times \vec{p}'')|}{|\vec{d}_{Rz}| \cdot |\vec{k}_1'' \times \vec{p}''|} \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $\vec{d}_{Ry}$  为直线  $Y_1''$  与直线  $p$  上分别任取一点,两点坐标相减得到的向量,  $\vec{d}_{Rz}$  同理。

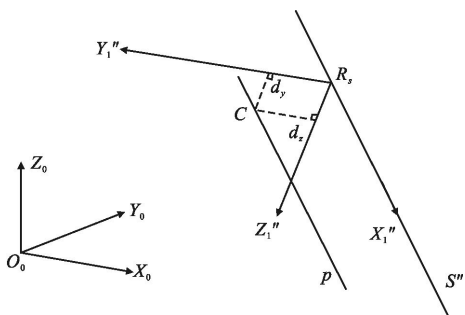


图 11 距离调整中的坐标系

Fig.11 Coordinate system in the distance adjustment

3 测量实验与结果

实际测量系统如图 12、13 所示,对待测孔直径为 10 mm,深度 100 mm 的管道进行了检测,在内壁上预先布置了若干不同直径的模拟缺陷点。实测中,相机帧率为 10 frame/s,图像展开的环形区域宽度为 5 pixel,展开半径为 275 pixel。由前文所述的数学关系,可得到此次测量的像素当量为 0.0181 mm/pixel,探头行进速度为 0.909 mm/s。



图 12 实际测量系统

Fig.12 Actual measurement system

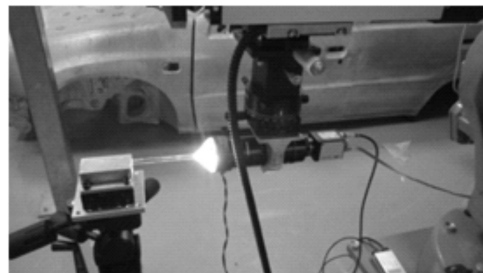


图 13 姿态调整系统及视觉传感部件

Fig.13 Adjusting system and vision sensing components

用机器人带动测量机构移动至待测孔附近,再用前述方法进行姿态调整并进行测量。对 0.6 mm、1.0 mm、2.0 mm 的若干缺陷点进行重复测量,可以看出,测量结果的标准差基本可以控制在 0.01 mm 以下,说明系统有着足够的稳定性和精度,系统方案可行。结果如图 14~15 所示。3 种模拟缺陷的测量结果如表 2 所示。

为了验证文中的结论,还进行了如下实验:直接

用机器人带动视觉测量机构进行步进运动,步长为 0.1 mm,行进 100 步,同时控制相机同步拍摄,所得到的图像经展开、拼接后如图 16 所示。

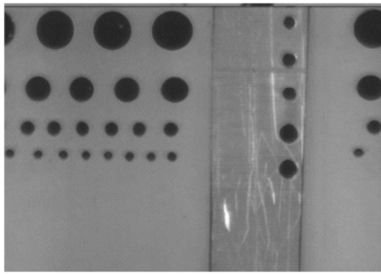


图 14 该次测量的最终结果图像

Fig.14 Result image of this measurement

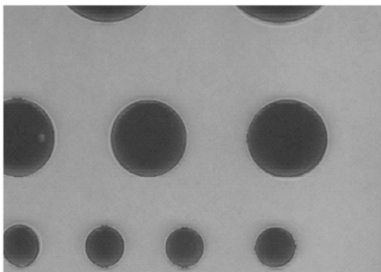


图 15 该次测量的最终结果图像(细节)

Fig.15 Result image of this measurement (details)

表 2 3 种模拟缺陷的测量结果

Tab.2 Measurement results of 3 simulated defects

Type of defects	Results		
	Mean value /mm	Standard deviation/mm	
0.6 mm	Defect1	0.592 536	0.007 149
	Defect2	0.601 317	0.008 23
	Defect3	0.614 053	0.005 736
1.0 mm	Defect1	0.985 098	0.003 167
	Defect2	1.009 553	0.004 886
	Defect3	0.992 863	0.005 098
2.0 mm	Defect1	1.999 146	0.003 455
	Defect2	2.003 669	0.011 575
	Defect3	2.121 783	0.005 497

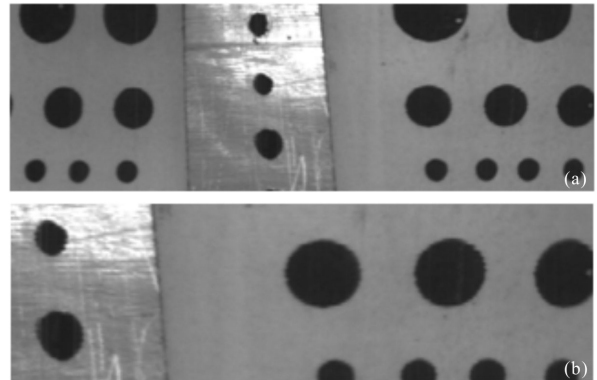


图 16 不使用平移台的系统所得到的拼接图像及细节

Fig.16 Combined image from system without motion stage and its details

根据机器人反馈系统传回的数据,其步长和末端法兰盘的方向在步进的过程中难以保持恒定,可以看出,由于步长不匀,方向发生偏移,缺陷点的形状发生了畸变,导致最终得到的图像质量远不如本文系统。而且,从某一深度开始出现光照不均匀的情况,这正是视像管方向发生改变的结果。这个实验更加验证了平移台的必要性。

## 4 结论

为了满足制造业中存在的微细孔壁缺陷测量的要求,基于外部光源导入、内部图像导出的思想,以视像管为核心器件,搭建了相应的测量系统并进行了实验。文中分析了已有测量系统的局限性,并提出了一种机器人连接电动位移台,再连接姿态调整装置和视觉测量机构的系统方案,并对其中的视像管姿态调整问题进行了分析。该方案的定位精度、测量精度均能达到较高标准,并且能够初步实现在线、柔性测量。应用该测量系统进行实验,对深度 100 mm,直径 10 mm 的待测孔中的 0.6 mm、1.0 mm、2.0 mm 直径缺陷进行测量,测量结果的标准差可以控制在 0.01 mm 左右。实验结果表明,文中所提出的系统方案,可以实现待测孔内壁缺陷的精确测量。下一步工作为:解决机器人负载不够的问题,将已有的姿态调整机构进行改进,用电动平移、升降台来代替相应手动装置,并在机器人末端法兰盘和电动平移台之间加装电动旋转、俯仰台来替代机器人 5、6 轴进行角度的精密调整,以实现更加精确的姿态调整,以及满足单孔、多孔测量时,系统自动、快速对准的要求。

## 参考文献:

- [1] Golinelli G, Selleri N. Plug gauge for checking dimensions of bores of mechanical parts: US, 4447960[P]. 1984-05-15.
- [2] Shcherbinin V, Blinov Y, Shleenkov A S, et al. On the development of national standards for magnetic and eddy-current nondestructive inspection of steel pipes [J]. *Russ J Nondestr Test*, 2009, 45(10): 740-743.
- [3] Nestleroth J, Davis R. Application of eddy currents induced by permanent magnets for pipeline inspection [J]. *NDT E Int*, 2007, 40(1): 77-84.
- [4] Qi Shufen, Liu Jiao, Jia Guangfen. Study of submarine pipeline corrosion based on ultrasonic detection and wavelet analysis [C]//ICCASM-Int Conf Comput Appl Syst Model, 2010, 12: 440-444.
- [5] Mizunuma M, Ogawa S, Kuwano H. Study on an optical design of the laser-beam scanning sensor for pipe inspection [J]. *Seimitsu Kogaku Kaishi*, 1998, 64(2): 251-255.
- [6] Leng Huiwen, Xu Chunguang, Feng Zhongwei, et al. Complex pipe outline dimensions measurement method based on Round structured light [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2010, 15(7): 1084-1090. (in Chinese)  
冷惠文, 徐春广, 冯忠伟, 等. 基于圆结构光的复杂深孔内轮廓尺寸测量方法[J]. *中国图象图形学报*, 2010, 15(7): 1084-1090.
- [7] Senoh M, Kozawa F, Yamada M. Development of shape measurement system using an omnidirectional sensor and light sectioning method with laser beam scanning for Hume pipes[J]. *Opt Eng*, 2006, 45(6): 064301-1-11.
- [8] Inari T, Takashima K, Watanabe M, et al. Optical inspection system for the inner surface of a pipe using detection of circular image projected by a laser source [J]. *Meas J Int Meas Confed*, 1994, 13(2): 99-106.
- [9] Hong E, Katz R, Hufnagel B, et al. Optical method for inspecting surface defects inside a small bore [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21 (1): 015704.
- [10] Wu B, Han W Q, Shao Z Y. Surface defects inspecting inside small bores based on machine vision [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2012, 23(11): 2137-2141.
- [11] Wu B, Shao Z Y, Zhang Y H. A new technology of building up defect measuring system for inner micro-pipe[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2014, 25(2): 293-298.
- [12] Shao Zhenyu. Research on key technologies for defects detection inside small pipes based on machine vision [D]. Tianjin: School of Precision Instruments and Optical Engineering, Tianjin University, 2013. (in Chinese)  
邵震宇. 基于机器视觉的微细孔壁缺陷检测关键技术研究 [D]. 天津: 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2013.