管道内表面圆结构光视觉三维测量系统

王 颖,张 瑞

(北京化工大学 信息科学与技术学院,北京 100029)

摘 要:为保证管道运输安全,需要对管道进行定期维护和检测。采用视觉检测原理,提出了一种基于圆结构光三维视觉检测的管道内表面测量系统。针对管道内表面测量空间受限的约束,基于圆结构光视觉检测原理,提出了视觉传感器的纵向排列结构模式,并搭建了管道内表面圆结构光视觉检测系统。针对圆结构光特点,设计了圆环形平面标定靶标,实现了圆结构光检测系统的标定,并基于该圆结构光视觉检测系统对工业管道内表面进行了三维测量。实验结果表明:该系统的标定不确定度为0.081 mm,针对管道内表面,具有较高的测量精度。

关键词:激光投射器; 系统校准; 圆环靶标; 管道; 视觉测量

中图分类号:TN247 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2014)03-0891-06

In-pipe surface circular structured light 3D vision inspection system

Wang Ying, Zhang Rui

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The in-pipe surface defect inspection is very important for pipe maintenance and repair. An pipe inner surface 3D vision inspection system was proposed based on the vision principle by using circular laser projector. Firstly, the principle of the circular laser light vision was given, and the in-pipe 3D vision inspection system based on the axial pattern was proposed aiming to the restricted space of the inner pipe. According to the characteristics of the inner pipe inspection system the planar target was designed with which the calibration of this system was completed. Finally, the industrial pipe′s inner surfaces were inspected based on the proposed circular structured light system, and the 3D shapes of in-pipe surfaces were reconstructed. Experimental results indicate that the system′s calibration precision is 0.081 mm and the measurement system proposed in the paper is suitable for the industrial pipe inner surface inspection.

Key words: laser projector; system calibration; circle target; pipe; vision detection

收稿日期:2013-07-05; **修订日期**:2013-08-03

基金项目:国家自然科学基金(50975019)

作者简介:王颖(1969-),女,副教授,博士,主要从事机器视觉检测方面的研究。Email:wangying@mail.buct.edu.cn

0 引 言

管道是气体和液体运输作最常用的传输方式，已被广泛用于气体和液体的运输。但由于传输介质具有腐蚀性，管道长期使用后容易发生腐蚀使得内阻增大或者产生孔洞引起泄漏，因此需要定期对管道内表面进行检测和维护。目前常用的管道内表面检测方法主要有超声波检测[1]、漏磁检测[2]及射线法[3]等非接触检测方法。漏磁法通过检测管道内部磁力线是否发生弯曲变形实现缺陷检测。超声波法利用管道内外表面反射回的超声波信号来判定缺陷的位置和大小，利用上述检测方法检测效率低，需要多次发射和接收信号，且对内表面的检测不具有可视性。近些年，随着光电技术的发展其已逐步成为工业领域重要的检测手段。基于光电检测技术的管道内表面检测方法主要有视频法[4]、光环截面法[5-6]、基于PSD 的检测方法[7]以及激光视觉检测法[8-9]等。

视频法将 CCD 摄像机安装在管道爬机上，利用拍摄的二维图像判断管道内表面的瑕疵和腐蚀，对管道腐蚀检测是二维的。光环截面法利用获取图像中圆光环灰度的异常来判断瑕疵，该方法要求激光器的光轴和管道轴线同轴，对测量系统的装配和测量环境要求高。基于 PSD 的检测方法利用激光器，被测对象和二维 PSD 构成的三角形实现对管内表面任意点的精确三维测量，但对某个截面的测量需多次扫描才能实现。结构光视觉检测利用激光投射器和摄像机及被测管道表面构成光学三角形，针对摄像机获取的图像，基于视觉检测模型进行管道内表面的检测。2004 年张广军等采用结构光视觉检测方法测量微小构件内表面三维形貌，但该方法只对微小构件(直径小于 15 mm)内表面检测进行了研究，没有研究较大管径管道内表面测量的可行性。

对管道内表面进行三维测量，利用测量结果计算腐蚀速率，同时对测量结果进行三维重构对于确定管道的维修方案提高管道利用率非常重要。由于管道内表面检测测量空间受限，尤其对于换热器和裂解反应器等列管内径小于 100 mm 的管道，由于管道径向尺寸的限制，当激光视觉检测系统的结构采用通常的横向结构时，系统体积过大不能实现管道内表面的测量。文中针对工业管道内表面，采用圆结构光投射器，设计了针对受限管道空间的视觉检测系统，并给出了基于平面靶标的结构光视觉传感器现场标定方法，实现了管道内表面三维测量。

1 圆结构光视觉检测系统的搭建

1.1 圆结构光视觉检测原理

圆结构光视觉检测原理如图 1 所示，系统由 CCD 摄像机、激光投射器和被测物体组成，激光投射器投射出圆锥曲面结构光被物体表面形状调制成包含物体三维信息的光条。设相交光条上的点 P 被摄像机拍摄，其透视投影关系如图 2 示，P 点对应的图像上的

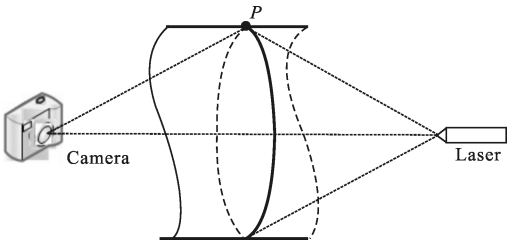

图 1 圆结构光检测

Fig.1 Circular structured light inspection

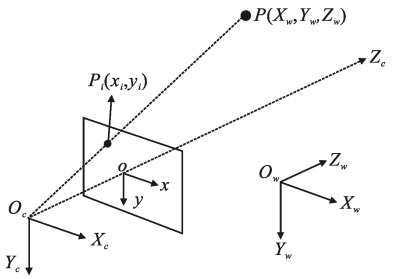

图 2 摄像机模型

Fig.2 Camera mode

像点为 P_i，其图像坐标为(x_i,y_i)，P 点在世界坐标系中的坐标为(X_w,Y_w,Z_w)，则由透视投影关系可得三维点 P 和其对应的像点之间的坐标转换关系如下：

$$s\begin{bmatrix}x_i\\y_i\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{A}\begin{bmatrix}r_1 & r_4 & r_7 & t_x\\r_2 & r_5 & r_8 & t_y\\r_3 & r_6 & r_9 & t_z\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_w\\Y_w\\Z_w\\1\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：s 为比例因子；$\boldsymbol{A}=\begin{vmatrix}f_x & 0 & C_x\\0 & f_y & C_y\\0 & 0 & 1\end{vmatrix}$ 为摄像机内参数矩阵，$f_x=\frac{f}{d_x}$，$f_y=\frac{f}{d_y}$，f 为摄像机焦距，d_x 和 d_y 分别为 X 方向与 Y 方向的像元尺寸；r_1~r_9 为摄像机坐标系和

世界坐标系的对应坐标轴夹角的余弦组成的矩阵;$(t_x,t_y,t_z)^{\mathrm{T}}$ 为摄像机光心和世界坐标原点之间的平移关系。进一步公式(1)可简化为下式:

$$\widetilde{sm}=\boldsymbol{A}[R\quad t]\widetilde{M}=\boldsymbol{H}\widetilde{M} \tag{2}$$

式中:$\widetilde{m}=[t_i\quad t_i\quad 1]^{\mathrm{T}}$ 为图像坐标系下的齐次坐标;$\widetilde{M}=[x_w\quad y_w\quad z_w\quad 1]^{\mathrm{T}}$,为世界坐标系下的齐次坐标;$\boldsymbol{H}=\boldsymbol{A}[r_1\quad r_2\quad r_3\quad t]$,称为单应性矩阵。

光曲面上空间点 P 同时满足圆锥曲面方程:

$$a_1X_w^2+a_2Y_w^2+a_3Z_w^2+a_4X_wY_w+a_5Y_wZ_w+a_6X_wZ_w+$$
$$a_7X_w+a_8Y_w+a_9Z_w+1=0 \tag{3}$$

式中:$a_1,a_2,\cdots,a_9$ 为圆锥曲面方程参数,若已知摄像机模型各参数以及圆锥曲面方程参数,联立公式(2)和(3)即可由图像点 P_i 确定空间点 P 在世界坐标系下的三维坐标。

1.2　系统结构设计

结构光视觉检测系统的激光投射器、被测物和摄像机的位置关系通常为横向结构如图 3 示，但该结构模式不适于测量空间较小的场合，对于管道内表面测量,需要结构光系统进入到管道内部,因此对于内径为 70~200 mm 工业管道其径向空间受限,横向排列结构无法进入管道内部实现三维测量。为此文中提出了如图 4 示的纵向排列模式，摄像机和激光器沿轴向排列，保证了结构光视觉传感器的小型化结构模式。系统由激光投射器、摄像机、被测管道及计算机等组成。摄像机和激光投射器沿管道轴向排列，摄像机和激光投射器之间的距离取决于激光投射器的发散角 、管道内径 以及摄像机的焦距 。测量时，投射的圆结构光和管道内表面相交形成圆光条，摄像机拍摄带有管道内表面信息的圆结构光图像后传输给计算机，每拍摄完一个轴向位置的截面图像,管道沿轴向移动固定间隔,拍摄下一截面的图像,最终获得不同截面处管道内表面的图像。

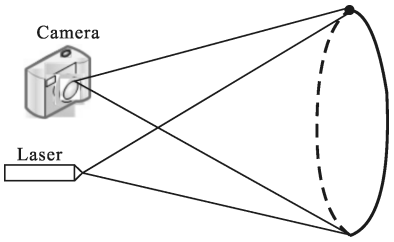

图 3 激光器与摄像机横向排列结构

Fig.3 Orientation arrange between camera and laser

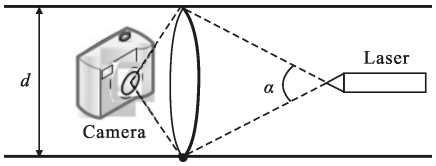

图 4 激光器与摄像机纵向排列结构

Fig.4 Axial arrange between camera and laser

2　圆结构光视觉传感器的标定

结构光标定点的获取一直是结构光检测的难题,很多标定方法需要精密的三维测量设备,标定设备复杂,成本高,而基于交比不变原理不需要三维测量设备,标定方法简单。

2.1　圆结构光标定平面靶标

摄像机标定通常采用棋盘格靶标，靶标上黑白相交的角点为其标定点。为实现摄像机和结构光曲面的同步标定,由于管道截面通常为圆形,针对圆结构光投射特点，圆结构光投射器投出的光和管道内表面相交通常为圆形，圆的直径受结构光发射角和管道内径所调制。因此基于圆结构光投射形状设计了黑白相间的圆环平面靶标，进行圆结构光和摄像机的同步标定。设计的靶标形式如图 5 示,靶标由黑白相间的同心圆环组成,最小圆半径为 10 mm,相邻圆的半径间隔为 10 mm。从圆心向四周等角间隔辐射 6 条射线，将黑白间隔圆环分割成等间隔和等夹角的扇形区域,每个扇形的圆心角为 300,圆环靶标上黑白相交处的角点为标定点，其三维坐标可由圆环半径及扇形圆心角计算得到。

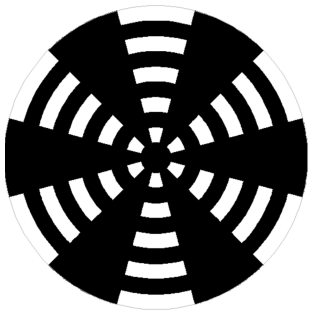

图 5 圆环平面靶标

Fig.5 Coplanar object for circle

2.2　圆结构光曲面标定点获取方法

交比不变是指空间直线上的共线点在经过透视投影后其在图像平面对应的投影线上的像点的交比

保持不变。如图 6 示空间直线 l 上分布着 A,B,C,D 四点，其投影线 l_1 上有和 A,B,C,D 分别对应的四个像点 A_1,B_1,C_1,D_1，且 A_1,B_1,C_1,D_1 也共线。若直线 l 上点 A,B,C,D 构成的交比为：

$$CR(A,B,C,D)=\frac{AC}{BC}:\frac{AD}{BD} \tag{4}$$

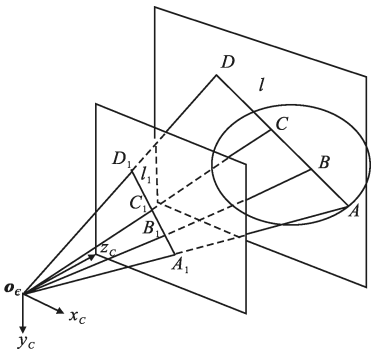

图 6 空间直线的交比不变

Fig.6 Invariance of cross-ratio of the space line

则可确定对应投影线上四个像点的交比为：

$$CR(A,B,C,D)=CR(A_1,B_1,C_1,D_1) \tag{5}$$

平面靶标上对应同一条射线上各角点的三维坐标已知，其角点图像位置以及光曲面和圆环靶标上射线的交点的图像位置可利用角点图像特征提取方法获得，圆结构光曲面和靶标平面相交的圆光条在某个圆环位置，由公式(5)即可确定圆结构光曲面上标定点的空间三维坐标。

2.3 视觉传感器的标定

利用 2.1 节设计的圆环形平面靶标，和 2.2 节的标定点获取方法，基于平面靶标，可实现圆结构光视觉检测系统的同步标定。标定时，向圆环靶标上投射圆结构光，摄像机拍摄带有圆结构光的靶标图像，在摄像机视场范围内移动圆环靶标，使得圆结构光曲面和靶标上不同的圆环相交，再次拍摄靶标图像，如是共拍摄四幅结构光和不同圆环相交的图像，提取每幅图像中圆结构光条和不同圆环上角点的亚像素坐标，由于角点的三维坐标精确已知，利用 2.2 节的公式即可获得圆结构光曲面上点的三维空间位置。该系统利用张正友法[10-11]进行摄像机标定，首先求解出单应性矩阵 $\boldsymbol{H}$，进而得到摄像机的内部结构参数焦距和光心，最终获得不同平面位置相对于摄像机的外部结构参数。

利用移动圆环靶标得到的圆结构光曲面上不同位置点的三维位置是相对于不同平面坐标系的，需要将曲面上所有三维点转换到同一坐标系下才能进行圆结构光曲面标定。文中以摄像机坐标系为中介，将不同平面坐标统一到全局坐标系下。如图 7 所示，靶标位于不同位置时的坐标系记为 $O_iX_iY_iZ_i(i=1,2,\cdots,n)$，由于利用移动圆环靶标已经获得摄像机相对于任一平面位置的外部结构参数，因此以摄像机坐标系为中介，可将所有位置的坐标系统一到任一平面位置，设定该位置为全局坐标系，记为 $O_wX_wY_wZ_w$。设不同平面位置坐标系下空间点的坐标通过公式(6)可转换成在摄像机坐标系下 $O_CX_CY_CZ_C$ 的坐标，公式(6)中 $\boldsymbol{R}_i$ 与 $\boldsymbol{T}_i$ 为不同位置平面坐标系相对于摄像机坐标系的旋转矩阵与平移向量。

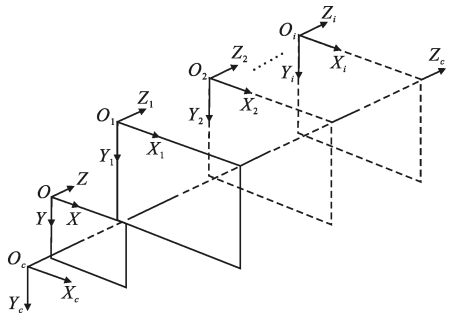

图 7 不同位置平面和全局坐标的关系

Fig.7 Relation between different planes and global coordinate

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}=\boldsymbol{R}_i\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}+\boldsymbol{T}_i \tag{6}$$

利用公式(7)将不同平面处的三维点位置统一到全局坐标系。

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix}=\boldsymbol{R}_1^{-1}\left\{\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}-\boldsymbol{T}_1\right\} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{R}_1$ 和 $\boldsymbol{T}_1$ 为全局坐标系相对于摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量。

采用上述方法进行了圆结构光视觉传感器的标定，将平面靶标放置在摄像机有效视场内的四个位置，分别拍摄位于不同空间位置的平面靶标，获取圆锥曲面上点的三维位置，并将不同平面位置的圆锥曲面上的标定点统一到全局坐标系。采用最小二乘法利用 20 个圆锥曲面上三维点求解式(3)的圆锥曲面参数。另取位于不同空间位置的 20 个光曲面上三维点，计算各点到标定的圆结构光曲面的距离，最终

计算得到距标定光曲面平均距离为 0.081 mm。

3 实验结果

搭建的管道内表面圆结构光视觉检测系统如图 8 所示。系统由 CCD 摄像机,圆激光投射器,计算机,被测工业管道,一维导轨及其附件组成。CCD 摄像机型号为敏通 MTC-23X11H, 有效像素数为720×540;圆激光投射器型号为 SNF-501C-660-20-11.4,激光出射半锥角为 11.4°;摄像机镜头焦距为 2.8 mm,视场角大于 90°。测量时沿管道轴向按固定位移间隔移动被测管道, 针对无缺陷和有缺陷管道分别拍摄了不同位置管道内表面图像, 共拍摄了十幅不同截面位置的管道内表面图像。管道内表面圆光条图像采用亚像素提取方法以提高测量精度, 光条提取方法详见[11],最终实现工业管道内表面的三维测量。

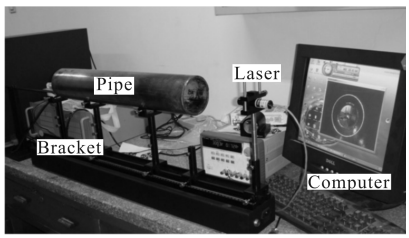

图 8 管道内表面圆结构光检测系统

Fig.8 Circular structured light detection system for in-pipe surface

图 9(a)和 9(b)为两幅无缺陷管道内表面光条图像。图 9(c)为管道内表面三维测量结果,图 9(d)为基于 OPGL 工具包实现的无缺陷管道内表面三维重构结果。针对上述管道,共进行了 3 次重复测量,三次测量的管道内径测量结果见表 1。

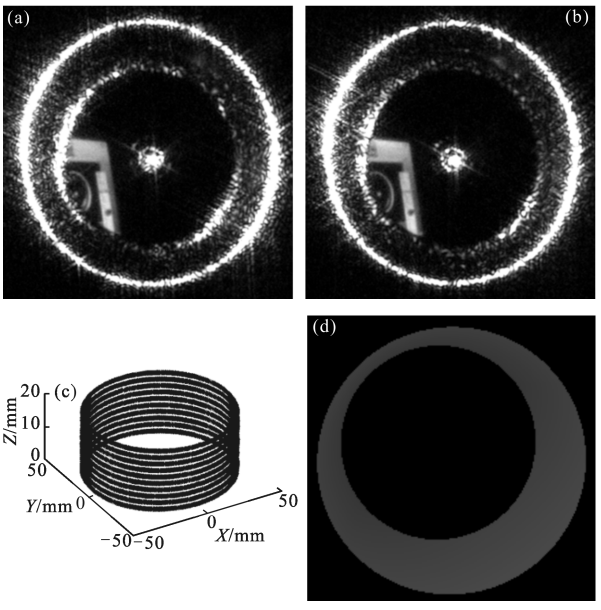

图 9 无缺陷管道内表面三维测量结果

Fig.9 3D reconstruction result without defection

表 1 管道内径测量结果

Tab.1 Results of the pipe inner diameter

Serial number	1	2	3
Mean diameter /mm	88.545	88.543	88.548

图 10 为有凸起缺陷管道内表面测量结果。图10(a)和 10(b)为两幅有缺陷管道内表面光条图像。由图10(a)和 10(b)可知,管道内下表面有一段向内凸起缺陷使得光曲面受调制发生向上弯曲,图 10(c)为有缺陷管道内表面三维测量结果。图 10(d)为基于 OPGL 工具包实现的有缺陷管道内表面三维重构结果。

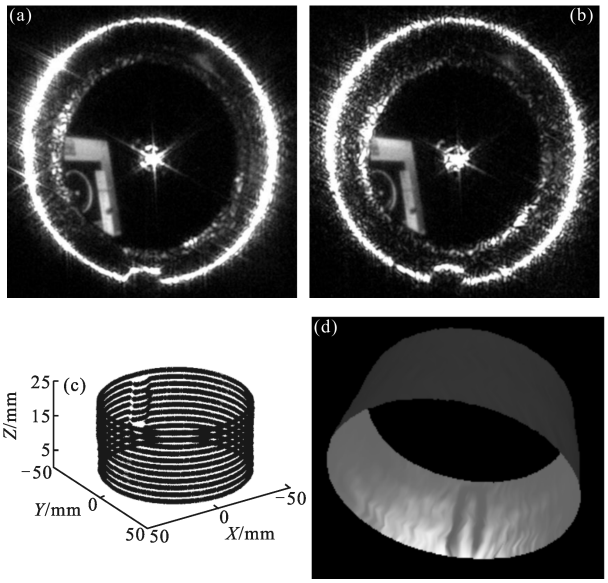

图 10 有缺陷管道内表面三维测量结果

Fig.10 3D reconstruction result with defection

4 结　论

文中针对测量空间受限的管道内表面, 提出了纵向排列结构的圆结构光视觉检测模式, 并搭建了管道内表面圆结构光三维视觉检测系统, 有效解决了受限空间三维测量的难题。并针对有缺陷和无缺陷工业管道内表面进行了三维测量。结果表明文中所提出的管道内表面视觉测量系统能够实现管道内表面的三维测量,测量不确定度小于 100 μm,对于

受限空间三维测量具有很好的适用性。

参考文献：

[1] Masahiko Hirao, Hirotsugu OgiAn. SH-wave EMAT technique for gas pipeline inspection [J]. ***NDT & E International***, 1999, 32: 127-132.

[2] Tang Ying, Pan Mengchun, Luo Feilu, et al. Detection of corrosion in pipeline using pulsed magnetic flux leakage testing[J]. ***Computer Measurement & Control***, 2010, 18(1): 38-43. (in Chinese)
唐莺, 潘孟春, 罗飞路, 等. 管道腐蚀检测中的脉冲漏磁检测技术[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(1): 38-43.

[3] Wang Ying, Wang Jianlin. Optoelectronic inspection of in-pipe surfaces [J]. ***Journal of Applied Optics***, 2008, 29(5): 735-739. (in Chinese)
王颖, 王建林. 细管道内表面光电检测方法研究 [J]. 应用光学, 2008, 29(5): 735-739.

[4] Yang Mingder, Su Tungching. Automated diagnosis of sewer pipe defects based on machine learning approaches [J]. ***Expert Systems with Applications***, 2008, 35: 1327-1337

[5] Duran O, Althoefor K, Lakmald, et al. A sensor for pipe inspection: model, analysis and image extraction [J]. ***International Conference on Image Processing***, 2003, 3: 597-600.

[6] Duran O, Althoefer K, Senevira Tne Lak Mald. Pipe inspection using a laser-based transducer and automated analysis techniques [J]. ***IEEE ASME Transactions on Mechalronics***, 2003, 8(3): 401-409.

[7] Shen Linyong, Li Yamin, Zhang Ya′nan, et al. Design and analysis of underground pipeline detecting system based on PSD [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2008, 16(8): 1429-1435. (in Chinese)
沈林勇, 李亚旻, 章亚男, 等. 基于 PSD 的地下管线探测装置设计与分析 [J]. 光学 精密工程, 2008, 16 (8): 1429-1435.

[8] Zhao Shilei, Qu Xinghua, Xing Shujian, et al. Large-scale diameter automatic measuring system based on laser non-contact measuring principle [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 41(8): 2186-2191. (in Chinese)
赵士磊, 曲兴华, 邢书剑, 等. 激光非接触式大尺寸内径自动测量系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 41(8): 2186-2191.

[9] Zhang Guangjun, He Junji, Li Xiuzhi. A novel 3D shape inspection system for inside surface of microminiature workpiece[J]. ***Journal of Scientific Instrument***, 2006, 27(3): 302-306. (in Chinese)
张广军, 贺俊吉, 李秀智. 一种新型的微小型构件内表面三维形貌检测系统[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(3): 302-306.

[10] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. ***IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence***, 2000, 22(11): 1330-1334.

[11] Zhang Rui. Study of in-pipe surface circle structured light vision 3D inspection technology [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012. (in Chinese)
张瑞. 管道内壁圆结构光视觉三维检测技术研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2012.