

基于圆结构光视觉三维点的孔洞缺陷识别及重构

张艳辉 金翠云 王 颖*

(北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘 要: 基于圆结构光视觉检测方法获取的管道内表面三维数据点以圆周形式存在的特点, 本文提出了距离约束条件来检测孔洞的方法, 即如果相邻两个圆周上对应的相邻两点之间的距离 d 均小于某一个阈值 d' , 则该处视为非孔洞, 否则视为孔洞, 并提出了新的三角网格化方法对带孔洞点云数据进行三角剖分且保留出孔洞。最后, 基于 VC++ 软件平台利用 OpenGL 实现管道孔洞缺陷检测和三维曲面重构, 实验结果表明该管道孔洞缺陷检测方法检测速度快、易于实现、具有较好的可视化效果。

关键词: 圆结构光; 孔洞; 缺陷检测; 三维重构

中图分类号: TP391

引 言

管道常用于气体和液体的传输, 及时准确地进行管道缺陷检测具有十分重要的现实意义。目前, 管道无损缺陷检测方法主要有漏磁检测、射线检测、超声检测、涡流检测和机器视觉检测等。其中漏磁、射线、超声波等检测方法检测效率低、对内表面的检测是间接的、不具有可见性, 同时对噪声较敏感容易发生误检^[1]。相比而言, 机器视觉检测方法具有测量精度高、非接触、信息量大、自动化程度高等优点, 已成为近年来国内外研究的热点。如宋丽梅等^[2]从影响灰度的因素出发, 根据单幅测量图像中留下的灰度信息来计算物体缺陷深度; 徐科等^[3]通过计算像素与背景区域的灰度差来检测可疑点; Moselhi 等^[4]通过图像灰度信息来对自来水管和下水道管进行表面缺陷检测。但这些方法基于图像灰度信息处理, 不能得到精确的物体三维形貌信息。Yang 等^[5]通过 CCTV 获取检测图像, 利用图像处理技术来描述管道缺陷结构; Duran 等^[6]提出由激光二极管向管道内壁投射环形光环来进行管道缺陷检测。上述方法都是基于获取的二维图像判断管道内表面是否有瑕疵和裂纹等, 不能对管道缺陷进行精确三

维测量和定位。王英惠等^[7]采用 ANN 算法搜索每个点的局部邻域数据点, 通过投影圆心角与阈值的比较来判断孔洞边界点, 该方法对于定向投影有重叠的三维点会产生错误判断。孙存亮^[8]提出以点集中平均最小两点欧式距离为判断依据来检测孔洞, 该算法需要对整个数据点云进行两次遍历, 搜索的时间复杂度高, 运算效率较低。

针对以上方法的不足, 本文基于圆结构光视觉检测技术获取管道内壁三维数据, 提出了距离约束条件来识别孔洞, 并利用 OpenGL 对管道内壁形貌信息进行三维重构, 以期实现管道内表面缺陷的可视化。

1 管道孔洞缺陷识别方法

1.1 圆结构光视觉检测系统原理

管道内表面圆结构光视觉检测原理如图 1 所示, 系统由激光投射器、摄像机和计算机组成。激光投射器向管道内表面投射圆锥面结构光, 和管道内壁相交形成明亮的光条, 由摄像机拍摄带有光条信息的管道内表面图像并传输到计算机中, 由计算机根据系统标定结果和图像特征提取结果得到管道内表面三维信息。测量时管道沿轴向移动, 测量不同截面位置处管道内表面的三维信息。

图 2 为拍摄的管道某一截面位置被内表面调制的光条图像。当激光器投射的圆锥面和管道内表面相交处存在凸起或凹陷时, 光条受内表面形状调制发生弯曲。

1.2 圆结构光孔洞识别方法

由于圆结构光视觉检测系统获取的管道内壁三

收稿日期: 2012-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(50975019)

第一作者: 女, 1985 年生, 硕士生

* 通讯联系人

E-mail: wangying@mail.buct.edu.cn

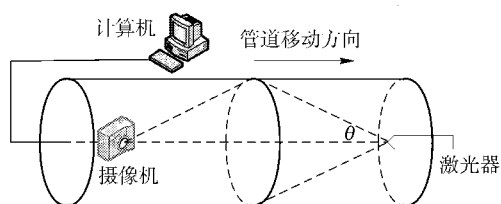


图1 管道内表面圆结构光视觉检测系统原理图

Fig. 1 Visual inspection schematic view of circle-structured light

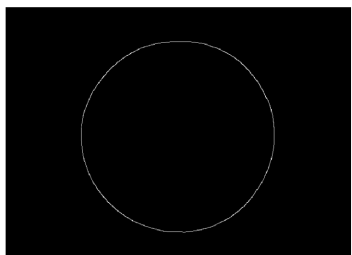


图2 管道内表面圆结构光条中心提取图

Fig. 2 Extraction results for circle light stripes

维数据点以圆周形式存在,为了形象描述和直观分析,将以圆周形式存在的管道截面三维数据展开为平面直线如图3所示。

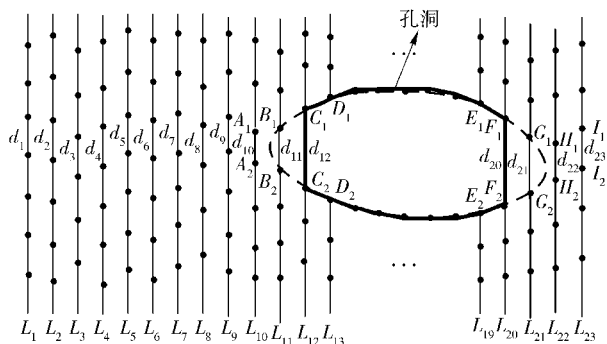


图3 圆结构光孔洞识别方法原理图

Fig. 3 Schematic view of holes identification of circle-structured light

图3中, $L_1 \sim L_{23}$ 代表每个管道截面三维数据点所组成的线。对于管道内表面无孔洞的部位 $L_1 \sim L_{10}$, d_i 和 d_{i+1} 为该区域内相邻两个圆周 L_i 、 L_{i+1} 对应的相邻数据点的距离,此时 d_i 和 d_{i+1} 均小于某一阈值 d' 。对于管道内表面存在孔洞的部位,相邻圆周线上相邻点之间的距离 d_i 和 d_{i+1} 至少有一个大于阈值 d' 。假设圆周线 $L_{13} \sim L_{19}$ 上对应的相邻点的距离 $d_{13} \sim d_{19}$ 都大于阈值 d' ,而圆周线 L_{12} 上的 d_{12} 和 L_{20} 上的 d_{20} 均小于阈值 d' 。根据孔洞判别条件, $d_{12} \sim d_{13}$ 、 $d_{19} \sim d_{20}$ 这两个区域也视为孔洞,因此可以确定 $C_1 D_1 \cdots E_1 F_1 \cdots D_2 C_2$ 为孔洞区域,其中 d_{12} 和 d_{20} 为孔

洞初始边界。

孔洞判别阈值 d' 的大小取决于三维点的疏密程度以及相邻点的平均距离。设每一圆周上第 i 个三维点与其相邻三维点的距离为 d_i ,则每个圆周上所有相邻点之间距离的平均值 d_p 如式(1)所示。

$$d_p = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (1)$$

式(1)中, n 为圆周上点的个数。所有圆周上相邻点之间距离的平均值 d'_p 可由式(2)得到

$$d'_p = \frac{\sum_{i=1}^N d_p}{N} \quad (2)$$

式(2)中, N 为所测量的管道内壁圆周总数。孔洞判别阈值 d' 由式(3)决定

$$d' = k d'_p \quad (3)$$

式(3)中, $k \geq 1$, k 的取值和所获取的三维数据点疏密程度相关,当三维数据点较密时, k 取值较大。

由于阈值的选取取决于平均距离和三维点数据的疏密程度,当数据点较稀疏时,会产生小孔洞漏判的情形,可通过减小 k 值来减小判别阈值 d' ,以便能识别出较小的孔洞。

1.3 孔洞边界识别方法

通常管道内表面孔洞中央部位圆周线上相邻点的距离较大,越靠近孔洞边界,圆周线上相邻点的距离逐渐减小,识别原理如图4所示。

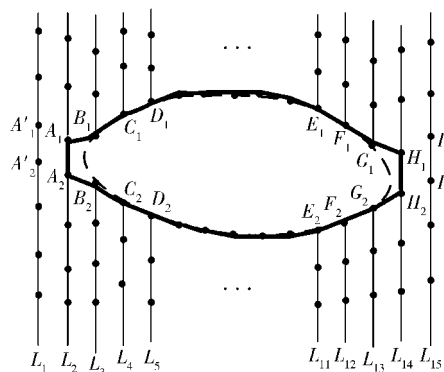


图4 孔洞边界识别方法原理图

Fig. 4 Schematic view of holes edge identification

对于孔洞左侧边界,相邻圆周线 L_4 、 L_5 对应的相邻点距离分别为 $C_1 C_2$ 、 $D_1 D_2$,此时 $D_1 D_2$ 的距离大于阈值 d' ,而 $C_1 C_2$ 的距离小于阈值 d' ,则可判定 $C_1 C_2$ 为孔洞边界起始位置。相应的 L_4 左侧圆周线 L_2 、 L_3 上对应相邻点的距离 $A_1 A_2$ 、 $B_1 B_2$ 均小于阈值 d' 。按照孔洞判别条件 $L_2 \sim L_4$ 对应的该区域为非孔洞,但

实际上该处是孔洞的边界顶点位置。因此为检测到精确的孔洞边界,根据孔洞判别条件,在检测出初始孔洞 $C_1D_1 \cdots E_1F_1 \cdots D_2C_2$ 后,在孔洞边界起始位置的左右两侧,适当减小孔洞判别阈值 d' ,直到相邻圆周线上相邻两点之间的距离近似相等,则孔洞边界检测结束。

2 管道内壁曲面重构

散乱点的三角剖分是曲面重构的最关键步骤,合理的三角网格划分能准确反映数据点间的拓扑结构进而得到更为精确的重构曲面。对管道内表面进行曲面重构,不仅实现管道内壁形貌三维可视化而且可以显示管道内壁缺陷。

2.1 基于圆结构光三维点的三角剖分方法

根据圆结构光视觉检测系统获取的管道内壁三维数据点以圆周形式存在的特点,为简化三角剖分过程,提出了新的三角网格化方法,如图5所示。

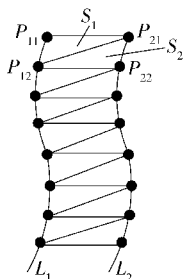


图5 三角面片构造方法

Fig. 5 Structure of triangular patches

L_1 、 L_2 代表数据简化之后相邻的两个圆周上三维数据点的集合; P_{11} 、 P_{12} 、 P_{21} 、 $P_{22} \cdots$ 代表每个数据点;每个小三角形即为一个小的三角面片,如三角面片 $S_1(P_{11}, P_{21}, P_{12})$, $S_2(P_{12}, P_{21}, P_{22}) \cdots$ 。利用这些三角面片,便可将空间点云数据以三维的形式加以重构。此方法构造网格简洁快速,大大提高了网格面重构速率,对于表面曲率变化不是十分剧烈的物体具有较好的重建效果。

2.2 带孔洞三角剖分实现方法

当管道表面存在孔洞时,在三角剖分过程中,孔洞有可能被三角片所覆盖。因此,曲面重构过程中为了表现出物体原始的表面造型,在三角剖分过程中要保留这些孔洞,实现物体真实形貌可视化。

如图6所示,按照三角剖分原理,ABCD圈被划分为了2个三角形面片ABD和DBC(图6(a)),实际上ABCD圈处为一个孔洞,需要保留出来,不需要三角剖分(图6(b))。而图6(a)中三角形面片ABD

和DBC覆盖了孔洞,形成了一张完整的网格,改变了物体真实形貌。因此对于管道壁上存在孔洞的情形,管道内表面三维散乱点三角剖分的具体实现步骤为:

(1) 用 L_i 代表每个管道截面数据简化后的三维点所组成的线;

(2) 用 P_1 、 P_2 、 P_x 代表每个小三角形面片的3个顶点;

(3) 若用 i 代表第一条线, $i+1$ 代表与 i 相邻的下一条线, $1 \leq i \leq N$, 其中 N 为圆结构光光条获取的管道内壁圆周个数;

(4) 取 P_1 为第 i 条线上的第一个点, P_2 为第 $i+1$ 条线上的第一个点;

(5) 计算 P_1 与其下一个点之间的距离记为 d_1 , P_2 与其下一个点之间的距离记为 d_2 , 若 d_1 、 d_2 均小于 d' , 则转(6)和(7); 否则, 这4个点之间不划分三角平面, 将 P_1 的值赋给 P_1 的下一个点, P_2 的值赋给 P_2 的下一个点, 转(5);

(6) 令 P_x 为第 i 条线上点 P_1 的下一个点, $1 < x \leq n$, n 为简化后每个管壁圆周上点的个数, 建立由 P_1 、 P_2 、 P_x 组成的平面, 把 P_x 的值赋给 P_1 ;

(7) 令 P_x 为第 $i+1$ 条线上点 P_2 的下一个点, $1 < x \leq n$, 建立由 P_1 、 P_2 、 P_x 组成的平面, 把 P_x 的值赋给 P_2 。

如此循环下去, 直到该圆周上包含的所有点都和其相邻圆周上的数据点组成三角面片为止。

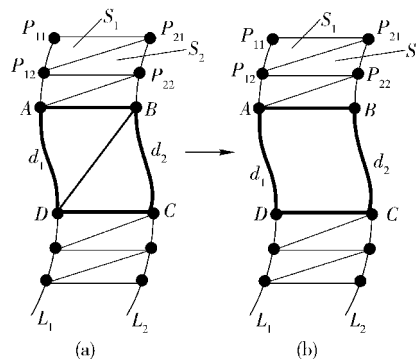


图6 三角剖分孔洞保留方法

Fig. 6 Retaining holes during triangulation

3 孔洞检测与曲面重构结果

根据圆结构光视觉检测系统获取管道内壁数据的特点,分别构造无缺陷管壁、含圆形孔洞管壁、含不规则孔洞管壁三种仿真三维数据点来验证孔洞缺陷识别方法。基于 VC++6.0 软件平台, 结合 OpenGL 来实现管道内壁孔洞缺陷识别及重构。

3.1 无缺陷管道三维重构

图 7(a) 为无缺陷管道内表面点云数据图形。实验数据共有 720 个点, 由 8 个圆周组成, 圆周半径取为 5 cm。图 7(b) 为对图 7(a) 进行三角剖分后的结果, 7(c) 为利用 OpenGL 对三角剖分之后的图形引入光照和材质后进行曲面重构的结果。

3.2 圆形孔洞缺陷三维重构

图 8 为管道壁上存在圆形孔洞缺陷的识别结果。实验数据共有 1380 个点, 共由 15 个圆周数据组成。为了获取更多的孔洞边界三维数据点, 缩小了孔洞周围几圈圆周数据之间的轴向步长。圆周半径设为 5 cm, 其中 d'_p 为 0.32 cm, 取 d' 为 0.66 cm。当连续两个圆周上对应的相邻两点之间的距离均小于 0.66 cm 时, 那么该处视为非孔洞, 否则视为孔洞。图 8(a) 为带孔洞原始数据点三角剖分之后的结果,

8(b) 为孔洞周围三角剖分局部放大图, 可以看出孔洞被保留下来, 没有被三角剖分, 图 8(c) 为三角剖分之后引入光照和材质条件孔洞缺陷管道内壁曲面重构结果。

3.3 不规则孔洞缺陷三维重构

图 9 为对管道壁上存在不规则多边形孔洞时进行缺陷识别的结果。实验数据共有 720 个点, 由 8 个圆周组成, 圆周半径取为 5 cm, 其中 d'_p 为 0.348 cm, 取 d' 为 0.58 cm。当连续两个圆周上对应的相邻两点之间的距离均小于 0.58 cm 时, 那么该处视为非孔洞, 否则视为孔洞。图 9(a) 为对原始数据点三角剖分之后的结果, 图 9(b) 为孔洞周围三角剖分局部放大图, 孔洞被完整保留下来, 图 9(c) 为三角剖分之后引入光照和材质条件孔洞缺陷管道内壁曲面重构结果。

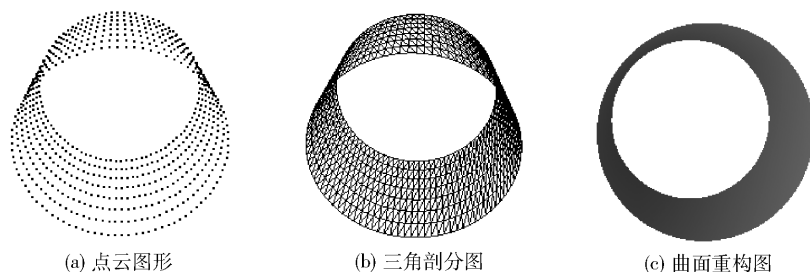


图 7 无缺陷管道三维重构图

Fig. 7 Three-dimensional reconstruction of defect-free pipe

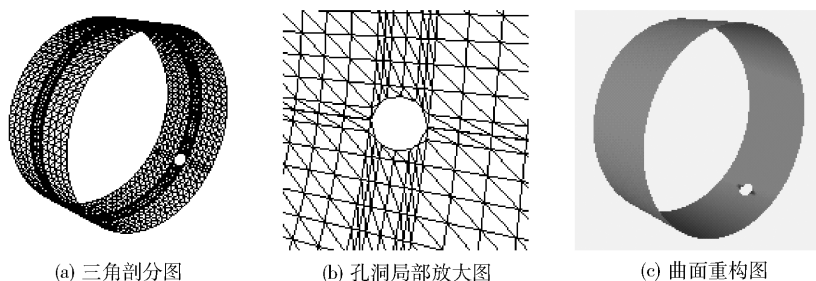


图 8 圆形孔洞缺陷管道三维重构图

Fig. 8 Three-dimensional reconstruction of a circular hole on the pipe surface

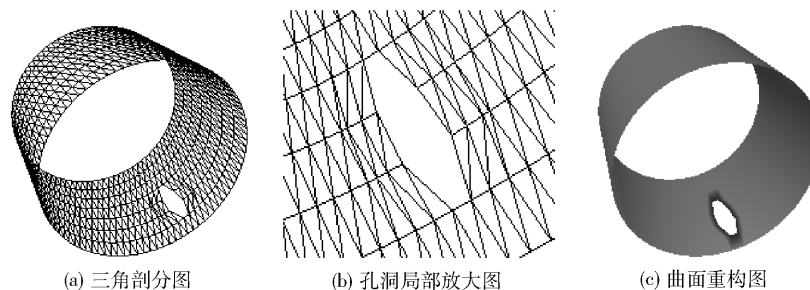


图 9 不规则多边形孔洞缺陷管道三维重构图

Fig. 9 Three-dimensional reconstruction of an irregular polygon hole on the pipe surface

4 结束语

目前,管道检测技术正朝着快速诊断、分析、识别缺陷,精确三维测量管道内表面瑕疵以及管壁缺陷三维图像直观显示的方向发展。本文基于圆结构光视觉检测系统获取管道内壁三维点云数据,通过相邻圆周线上对应的相邻三维点之间的距离来识别孔洞缺陷,并通过在孔洞边界处减小判别阈值来实现孔洞边界部位的精确判定。通过构造仿真三维数据点进行实验验证,证明该方法能够准确快速地识别孔洞并完成精确的三维图形显示,对管道孔洞缺陷的精确检测和三维可视化具有重要应用价值。

参考文献:

- [1] Gomez F, Althoefer K, Seneviratne L D. Modeling of ultrasound sensor for pipe inspection[C] // Proceeding of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Taipei, Taiwan, September 14-19, 2003: 2555-2560.
- [2] 宋丽梅,周兴林,徐可欣,等. 基于单幅测量图像的三维缺陷检测技术[J]. 光学学报, 2005, 25(9): 1195-1200.
Song L M, Zhou X L, Xu K X, et al. Three-dimensional defect detection based on single measurement image[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(9): 1195-1200. (in Chinese)
- [3] 徐科,徐金梧. 基于图象处理的冷轧带钢表面缺陷在线检测技术[J]. 钢铁, 2002, 37(12): 61-64.
Xu K, Xu J W. On-line inspection of surface defects of cold rolled strips based on image processing[J]. Iron & Steel, 2002, 37(12): 61-64. (in Chinese)
- [4] Moselhi O, Shehab-Eldeen T. Automated detection of surface defects in water and sewer pipes[J]. Automation in Construction, 1999, 8(5): 581-588.
- [5] Yang M D, Su T H. Automated diagnosis of sewer pipe defects based on machine learning approaches[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35: 1327-1337.
- [6] Duran O, Althoefer K, Seneviratne L D. Automated pipe defect detection and categorization using camera/laser-based profiler and artificial neural network[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2007, 4(1): 118-126.
- [7] 王英惠,吴维勇. 基于局部细分曲面拟合的散乱数据孔洞修补算法[J]. 机械设计, 2009, 26(12): 72-74.
Wang Y H, Wu W Y. Holes repairing algorithm of scattered data based on the fitting of partial subdivision curved surface[J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(12): 72-74. (in Chinese)
- [8] 孙存亮. 空间散乱点曲面重构的三角剖分技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.
Sun C L. The study of triangulation about space scattered points[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)

Detection of pipe holes and their reconstruction based on circle-structured light

ZHANG YanHui JIN CuiYun WANG Ying

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

Abstract: Based on machine vision, three-dimensional data for the inner surface of a pipe were obtained by circle-structured light in the form of a circumference, and hence a distance constraint has been proposed in order to detect holes. That is, on two adjacent circumferences, if the distances between two corresponding adjacent points are all smaller than a certain threshold, then we view this place as a non-hole; otherwise, we view it as a hole. A new triangulation method was also proposed to triangulate the point cloud data with holes, and to retain the holes. Finally, OpenGL was used for surface reconstruction to achieve three-dimensional visualization. The experimental results show that this method is fast and easy to implement, and it has a good visual effect.

Key words: circle structured light; holes; defect detection; 3D reconstruction