

基于工业 CT 图像的零件尺寸测量方法

薛 林, 张德健, 何 群, 马 凯, 徐佳龙

(大连理工大学 机械工程学院, 大连 116024)

摘要: 为了获得高精度工业 CT 尺寸测量结果, 针对工业结构中常见的圆柱体提出了一种亚体素 CT 图像尺寸测量方法。首先使用 MarchingCubes 方法检测边缘点和法线, 然后顶点沿着法线方向移动到梯度最大值处, 最后采用点云分割方法获得圆柱体直径。在仿真数据中验证了该方法的测量精度优于全局表面测定方法的测量精度, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 工业 CT; 尺寸测量; 边缘检测; 点云分割

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2023)07-0016-04

A dimensional metrology method of components based on industrial CT image

XUE Lin, ZHANG Dejian, HE Qun, MA Kai, XU Jialong

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To obtain high-accuracy dimensional metrology results of industrial CT, a dimensional metrology method of sub-voxel CT image was proposed for cylinder, which was a common geometric structure in the industry. Firstly, the MarchingCubes method was used to detect the edge points and normal lines. Then the vertices were moved along the normal direction to the maximum gradient. Finally, the point cloud segmentation method was used to get the diameter of the cylinder. The measurement accuracy of this method had been verified in simulation data to be superior to that of the global surface measurement method, and which had a certain engineering application value.

Key words: industrial CT; dimensional metrology; edge detection; point cloud segmentation

工业 CT(计算机断层扫描)在汽车制造^[1]、航空航天^[2]、增材制造^[3-4]等领域的零部件内部结构检查和尺寸测量方面优势突出。与激光、结构光等非接触式测量方法相比, CT 尺寸测量可以获得物体内部的几何结构和尺寸信息; 与三坐标测量仪、表面轮廓仪等接触式测量方法相比, CT 尺寸测量获取被测物体内部信息时不需要破坏物体^[5]。目前, 用于尺寸测量的 CT 是唯一能够在不破坏和切割零件的情况下测量零件内部和外部几何形状的方法^[6]。

CT 测量流程较为复杂, 测量过程中有很多影

响数据提取准确性和测量结果可靠性的因素, 例如操作人员的熟练度、CT 扫描参数的设置、旋转台运动精度、图像伪影和噪声、图像的缩放误差、图像边缘模糊等。除了上述问题, CT 测量过程中的表面提取方法也是 CT 尺寸测量的关键影响因素。CT 图像本质上是由体素构成的三维数据集, 表面测定算法用于将 CT 数据转换成物体的三维模型。

表面测定算法分为全局方法和局部方法, 全局方法通过使用一个全局阈值直接提取物体的表面, 在大多数情况下, 没有一个合适的全局阈值可以获取精确的测量尺寸^[7]; 局部方法通过计算 CT 图像的最大梯度来提取物体的边缘^[8-9], 获得更加准确的测量结果。由于 CT 尺寸测量受到多种因素的影响, 故采用基于 MarchingCubes(MC) 算法^[10]的局部顶点移动方法来提高边缘检测的精度, 然后采用

收稿日期: 2023-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51905074)

作者简介: 薛林(1986—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为高精度工业 CT、机械视觉

通信作者: 张德健, 909981783@qq.com

RANSAC 点云分割方法将圆柱体分割出来并测量圆柱直径，获得高精度的尺寸测量结果。

1 CT 圆柱体直径测量方法

CT 系统的硬件部分主要包含 X 射线源、旋转台和探测器。测量时，物体放置在旋转台上旋转 360° ，探测器记录不同位置的数据得到一系列投影

图片，然后经过重建算法得到三维 CT 数据，最后经过表面提取得到三维模型用于尺寸测量。CT 尺寸测量系统组成及工作流程如图 1 所示。提出的方法分为初始边缘点获取、局部顶点移动、RANSAC 圆柱体点云分割 3 部分，应用在表面提取环节的边缘检测和尺寸测量时，不需要经过网格化，可直接由圆柱点云测量物体的直径。

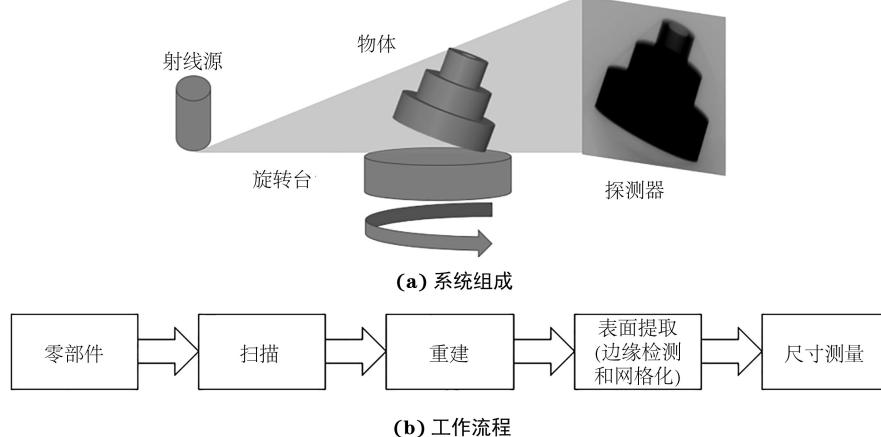


图 1 CT 尺寸测量系统组成及基本工作流程

1.1 初始边缘点的获取

采用 MC 方法获取初始边缘点，从三维网格中重建出物体的三维模型（两个关键要素是三维网格和等值面）。CT 扫描样件获得的体素在空间中均匀分布，空间中两张相邻 CT 切片的 8 个体素点构成一个三维网格，网格的顶点由 CT 图像的体素点构成，每个顶点都具有相应的位置和体素值，等值面是三维网格中具有相同体素值的点的集合，其表示为

$$\{f(x, y, z) = T\} \quad (1)$$

式中： T 为等值面阈值； $f(x, y, z)$ 为空间坐标 (x, y, z) 的体素值。

等值面阈值采用的 OTSU（一种算法）阈值，该阈值将图像分为前景和背景两部分，单种材料扫描样品的 CT 图像灰度值直方图符合双峰特征，OTSU 阈值使得前景和背景的差异最大。一个网格有 8 个顶点，每个顶点有内点和外点两种属性，所以每个网格有 2^8 种状态，根据互补对称性和旋转对称性，可以化简为如图 2 所示的 15 种状态。图 2 中的第 0 种状态表示当前网格的顶点属性全为 0 或者全为 1，说明网格与等值面没有交点；第 1 种状态代表当前网格中有 1 个顶点的属性与其他顶点的属性不同。每个顶点可能在等值面内侧或者外侧，所以 8 个顶点一共可以代表 16 种状态。

寻找所有的边界网格，根据交点的个数和位置

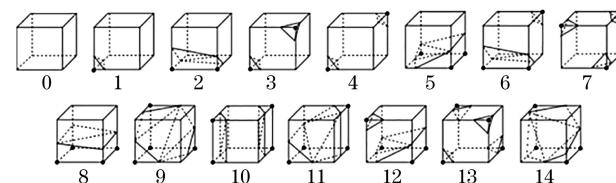


图 2 15 种网格状态组合

构造等值面，若等值面与网格相交，则采用线性插值的方法计算等值面的坐标。如图 3 所示，假设网格顶点 V_7 的体素值大于 T ，其余顶点的体素值小于 T ，那么网格的边 V_5V_7, V_3V_7, V_6V_7 ，分别与等值面交于点 P_0, P_1, P_2 ，3 个点形成一个等值面，构成三维网格模型的一个三角面片。

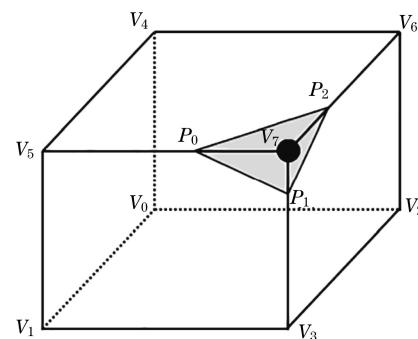


图 3 等值面计算示意

1.2 局部顶点移动

对三维 CT 数据使用 MC 算法，得到的是被扫

描部件的三角面片网格模型，物体的三维模型由三角面片组成，三角面片的顶点是等值面与 CT 网格的交点，三角面片的连接方式取决于 CT 网格顶点与等值面阈值 T 的关系。三角面片网格模型的顶点是边缘检测得到的初始边缘点，用于后续的局部顶点移动(顶点沿顶点法线方向移动)。顶点的法线计算公式为

$$\mathbf{n}(p) = \frac{\sum_i A_i \mathbf{n}_i}{\left\| \sum_i A_i \mathbf{n}_i \right\|} \quad (2)$$

式中： p 为初始边缘检测到的顶点； $\mathbf{n}(p)$ 为顶点 p 的法线； i 为包含该顶点的第 i 个三角面片； A_i 为第 i 个三角面片的面积； \mathbf{n}_i 为第 i 个三角面片的法向量。

根据 Canny 边缘检测^[11]步骤中的非极大值抑制原理，边缘点 B 的梯度值 $\|g(B)\|$ 大于当前点梯度方向上相邻两点 A 和 C 的梯度值。采用 MC 方法提取等值面上的顶点作为初始边缘点，以顶点的法线方向为顶点的梯度方向进行 3 次线性插值，寻找梯度值最大的点。

1.3 圆柱点云分割

三维点云分割是将具有某种相同属性的点云单独提取出来，以便单独对提取的点云进行处理。RANSAC 方法^[12]在 1981 年被提出，用来解决模型估计问题。该方法是一种基于数学的方法，可以用于检测平面、圆柱、球体等各种模型。最小二乘法拟合受异常数据点的影响较大，引入 RANSAC 算法的最小二乘法可以排除异常数据点的干扰，通过 RANSAC 点云分割，可以将局部顶点移动得到的点云中的圆柱体全部提取出来(见图 4)。

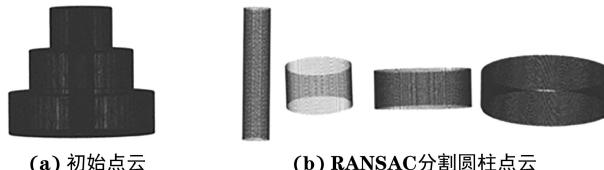


图 4 圆柱体点云分割案例

RANSAC 算法将所有的点划分为内点数据和外点数据，内点数据是符合模型算法的小于所设定阈值的点，外点数据是大于所设定阈值的点。每一次随机抽取一组点，利用式(3)对该组点进行最小二乘拟合。

$$\operatorname{argmin} \sum \{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 - [a(x_i - x_0) + b(y_i - y_0) + c(z_i - z_0)]^2 - r_0^2\}^2 \quad (3)$$

式中： (x_i, y_i, z_i) 为组内任意点的坐标； $(x_0, y_0,$

$z_0)$ 为当前提取的圆柱轴线方向上某点的坐标； (a, b, c) 为圆柱的轴线向量； r_0 为圆柱的半径； argmin 为最小二乘拟合算法。

记录组内满足小于阈值的点的数量，将该数量作为评价指标。进行多次随机取点，统计每组数据的评价指标，评价指标最大的数据组中的内点数据即为最终样本点，用于拟合的参数即为圆柱的几何特征参数。

2 试验与分析

2.1 试验验证

试验验证部分采用模拟 CT 数据，将图 5 所示参考样品的三维 CAD(计算机辅助设计)模型导入到商业软件包 aRTist 中，该软件包采用基于射线追踪的方法生成投影数据，然后对得到的 CT 投影数据使用 FDK^[13]算法进行三维重建，生成三维 CT 体数据。模拟试验使用锥束 CT 面阵系统，样品材料为铝，X 射线能量为 200 kV，电流为 80 μ A，投影数量为 1 500，体素大小为 0.15 mm，图像大小为 600 \times 600(像素)。

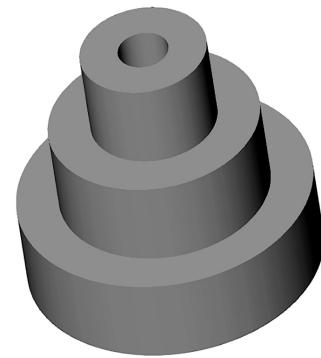


图 5 参考样品的 CAD 模型

参考样品是由 4 个圆柱体构成的阶梯圆柱，其中 3 个圆柱为轴，1 个圆柱为通孔。轴是外轮廓，用来验证所提方法对外部圆柱尺寸的测量精度；通孔是内轮廓，用来验证所提方法对内部圆柱尺寸的测量精度。将通孔称为圆柱 1，样品从上到下第 1 阶梯圆柱为圆柱 2，第 2 阶梯为圆柱 3，第 3 阶梯为圆柱 4。使用所提方法提取 CT 体数据的亚体素点云进行圆柱直径测量，采用全局阈值方法提取物体的模型，测量 4 个圆柱的直径，结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出，所提方法的测量误差绝对值(平均值为 0.0125 mm)均小于全局方法的，全局方法测量误差的绝对值平均值为 0.02 mm。为了更全面地评估所使用的圆柱体点云提取方法，以参

表 1 圆柱体直径的 CT 测量结果 mm

项目	圆柱 1	圆柱 2	圆柱 3	圆柱 4
标准值	10.000	30.000	50.000	70.000
所提方法	9.981	30.012	50.010	69.991
全局方法	9.979	30.020	50.018	70.021
所提方法误差	-0.019	0.012	0.010	0.009
全局误差	-0.021	0.020	0.018	0.021

考样品 CAD 模型为真值,将全局方法与所提方法获取的点云作为测试数据进行配准,设置公差为±0.025 mm,将偏离公差带的测量点视为错误点,对比结果如图 6 所示。

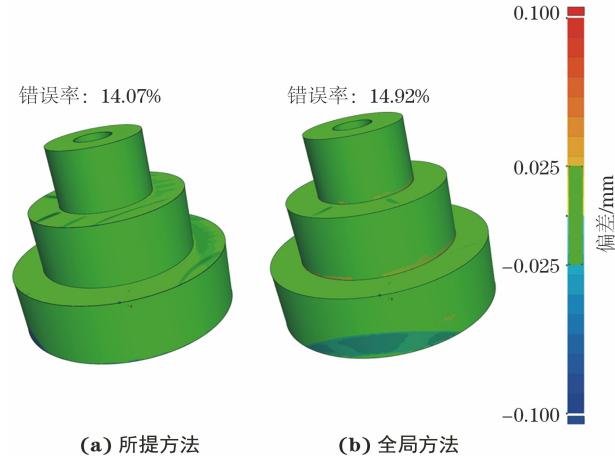


图 6 点云提取方法的对比结果

为了验证所提方法在噪声影响下对圆柱体点云的提取效果,设计高斯噪声干扰试验。向重建好的三维 CT 体数据添加 4 组高斯噪声,标准差分别为 500,1 000,1 500,2 000。用所提算法提取 CT 图像的边缘点并且用全局方法提取物体的三维模型,以参考样品的 CAD 模型为真值,添加噪声后所提边缘点提取方法与全局法提取的结果对比如图 7 所示。

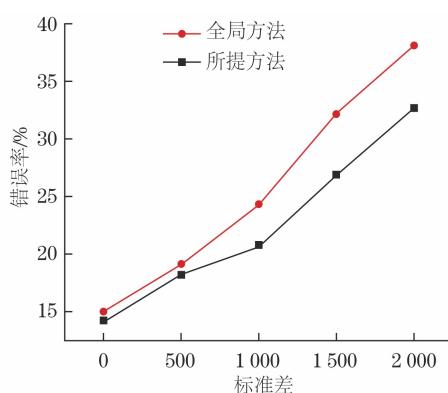


图 7 噪声干扰下两种方法的提取结果对比

2.2 结果分析

采用仿真软件生成的理想 CT 圆柱数据作为测

量对象,以参考样品的 CAD 模型作为真实数据,对比所提方法与全局方法圆柱体的直径测量结果,结果表明所提方法的精度更高。所提方法提取点云的错误率为 14.07%,略小于全局方法的错误率 14.92%,前者点云提取的错误主要集中在平面部分,其主要是 CT 重建伪影引起的,后续需要考虑该方法对伪影的鲁棒性。噪声模拟试验说明,在不同程度的噪声影响下,所提方法的错误率明显小于全局方法的错误率,精度更高,鲁棒性更好。

3 结语

提出了一种基于工业 CT 的圆柱体尺寸测量方法,该方法可以测量 CT 图像中每一个圆柱体的直径。试验证明了该方法的圆柱体直径测量精度优于全局方法的。在噪声干扰对比试验中,所提方法的点云提取精度高于全局方法的,对噪声具有较好的鲁棒性。基于工业 CT 的圆柱体尺寸测量获得了较好的结果,展现出了 CT 在尺寸测量方面的优越性能,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 康克军,陈志强,肖永顺,等.适于大型装备缺陷检测的工业 CT 辐射成像技术[J].中国体视学与图像分析,2016,21(1):14-21.
- [2] 王倩妮,苏宇航,郭广平.基于工业 CT 图像的空心涡轮叶片壁厚测量法[J].无损检测,2015,37(6):29-32.
- [3] 张祥春,张祥林,刘钊,等.工业 CT 技术在激光选区熔化增材制造中的应用[J].无损检测,2019,41(3):52-57.
- [4] 胡婷萍,高丽敏,杨海楠.航空航天用增材制造金属结构件的无损检测研究进展[J].航空制造技术,2019,62(8):70-75,87.
- [5] LIFTON J J, MALCOLM A A, MCBRIDE J W. On the uncertainty of surface determination in X-ray computed tomography for dimensional metrology[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(3): 035003.
- [6] KRUTH J P, BARTSCHER M, CARMIGNATO S, et al. Computed tomography for dimensional metrology[J]. CIRP Annals, 2011, 60(2):821-842.
- [7] KOWALUK T, WOZNIAK A. A new threshold selection method for X-ray computed tomography for dimensional metrology [J]. Precision Engineering, 2017, 50:449-454.

(下转第 60 页)

- [5] JIN S J, LIU C F, SHI S Q, et al. Comparison of morphology characterization for regular cracks with multi-mode total focusing method[C]//2019 Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT). Qingdao, China: IEEE, 2020: 21-25.
- [6] 李衍. 多模式全聚焦法成像解析[J]. 无损探伤, 2021, 45(4): 1-6.
- [7] 金士杰, 刘晨飞, 史思琪, 等. 基于全模式全聚焦方法的裂纹超声成像定量检测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 183-190.
- [8] 宋小军, 张璠, 黄琼, 等. 基于全聚焦算法的骨折超声成像研究[J]. 声学技术, 2021, 40(4): 475-481.
- [9] 张超才, 韩军, 龙晋桓, 等. 基于超声相控阵的小径薄壁管座角焊缝检测 CIVA 仿真[J]. 中国测试, 2021, 47(7): 19-25.
- [10] 池强强. 超声相控阵检测的数值模拟及全聚焦成像研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2019.
- [11] 宋寿鹏, 陈仪倩. 超声全聚焦成像中等声程线伪影剔除方法[J]. 应用声学, 2022, 41(4): 527-534.
- [12] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Defect characterization using an ultrasonic array to measure the scattering coefficient matrix[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, 55(10): 2254-2265.
- [13] SCHMERR L W. Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation[M]. Switzerland: Springer, 2016.
- [14] BUDYN N, BEVAN R L T, ZHANG J, et al. A model for multiview ultrasonic array inspection of small two-dimensional defects[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019, 66(6): 1129-1139.
- [15] DRINKWATER B W, WILCOX P D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: a review[J]. NDT & E International, 2006, 39(7): 525-541.
- [16] ZHANG J, FELICE M V, VELICHKO A, et al. Angular and frequency behaviour of elastodynamic scattering from embedded scatterers[J]. Ultrasonics, 2019, 99: 105964.
- [17] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. The use of ultrasonic arrays to characterize crack-like defects[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2010, 29(4): 222-232.

(上接第 19 页)

- [8] LIFTON J J, LIU T. Evaluation of the standard measurement uncertainty due to the ISO 50 surface determination method for dimensional computed tomography[J]. Precision Engineering, 2020, 61: 82-92.
- [9] HEINZL C, KLINGESBERGER R, KASTNER J, et al. Robust surface detection for variance comparison and dimensional measurement[J]. Physik in Unserer Zt, 2006, 13(1): 14-21.
- [10] LORENSEN W E, CLINE H E. Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4): 163-169.
- [11] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. Readings in Computer Vision, 1987: 184-203.
- [12] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Readings in Computer Vision, 1987: 726-740.
- [13] FELDKAMP L A, DAVIS L C, KRESS J W. Practical cone-beam algorithm [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1984, 1(6): 612.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告