测试与故障诊断

文章编号:1671-4598(2016)02-0014-04 DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2016.02.004 中图分类号:TP391 文献标识码:A

基于三维激光扫描和 BIM 的构件缺陷检测技术

钱 海,马小军,包仁标,徐 胜

(南京工业大学 电气工程与控制科学学院,南京 211800)

摘要:: 为了自动检测建筑构件在生产及运输过程中产生的缺陷,提出了基于三维激光扫描和 BIM 模型的建筑构件检测方法;首先 利用三维激光扫描仪获取构件对象的实际点云,并通过弦高偏差法实现点云去噪,同时基于 BIM 搭建构件的三维模型,通过 stl 文件将 模型对象转换为期望点云; 然后分别利用 PCA 算法和基于 K-D 树的 ICP 算法实现点云的初始配准和精配准;最后利用局部均方根值评 估构件的误差大小,并通过基于霍夫变换的线性回归分析方法实现了误差量化;通过实例验证了所提算法的可行性与准确性。 关键词: 三维激光扫描; BIM;点云; 配准;构件误差

Technology Based on 3D Laser Scanner and BIM for Detecting Defects of Component

Qian Hai, Ma Xiaojun, Bao Renbiao, Xu Sheng

(College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China) **Abstract**: To automatically detect the defects in the process of production and transportation, a building component detection method based on 3D laser scanning and building information modeling (BIM) model is proposed. Firstly component object' s actual point cloud is acquired by 3D laser scanner. Noise of point cloud is removed through the chord deviation method, and construction components' 3D model is built based on BIM. Model objects is converted to desired point cloud through the STL file. Then the initial registration and precise registration of point cloud are realized by principle component analysis algorithm (PCA) and independent component analysis algorithm (ICP) based on K-D tree. Finally, the error of the component is evaluated by the local root mean square value, and the error is quantified by the linear regression analysis method based on Hough transform. The feasibility and accuracy of the proposed algorithm are verified by practical application.

Keywords: 3D laser scanning; BIM; point cloud; registration; component error

0 引言

目前检测评估建筑构件质量通常依赖传统的手工测量设备, 检查结果记录在纸上,这种方法不仅耗时、不准确且沟通交流 效率低下。据调查统计,在美国多达10%的建设成本用于因材 料缺陷而导致的返工^[1]。因此需要提高建筑构件缺陷的检测水 平与效率,避免检查过程的不准确,以及时调整、修理或更换 有缺陷的部分。Hass^[2]提出了一种基于 BIM 的自动辨识扫描对 象的方法,Bosche^[3]提出了一种配准三维激光扫描和三维建筑 模型的方法,这些方法主要检测基础设施的损坏程度,例如混 凝土结构裂缝,但是通常无法检测潜在的构件误差。

在工程领域,激光扫描仪被认为是最适用于建筑工程监测、施工流程控制的工具,而 BIM 模型集成了施工项目的大量数据,包括构件的位置、尺寸。本文将两种技术结合研究检测建筑构件缺陷的方法,实现建筑构件的误差量化。

1 总体方案

本文提出的检测方法总体思路是通过激光扫描获取实际构件的点云数据,与标准的三维模型对象对比,发现并量化构件的生产缺陷。该方法流程如图1所示。该方法包括3个主要步

骤:1) 点云预处理:获取点云对象;2) 点云配准;3) 状态 评估:检测并量化缺陷。



2 关键技术研究

2.1 预处理

2.1.1 格式转换

BIM 模型包含标准构件的三维信息,但不管是 CAD 还是 BIM,其包含的对象因数据格式与获取的三维点云不同,很难 做对比研究。这些实体对象必须转换成能和点云数据对比的数 据集。本文使用 STL 格式将 3D 实体对象转换为 3D 点云^[4]。 .stl 文件是在计算机图形应用系统中一个开源文件格式,用于 表示三角形网格。在 STL 文件中的三角面片的信息单元 facet 是一个带矢量方向的三角面片,STL 三维模型就是由一系列

收稿日期:2015-07-29; 修回日期:2015-08-31。

作者简介:钱 海(1991-),男,江苏靖江人,研究生,主要从事建筑 智能化技术方向的研究。

马小军(1956-),男,江苏南京人,教授,主要从事建筑电气与智能 化、智能照明控制及 BIM 技术方向的研究。

这样的三角面片构成,将三维实体对象转换成点云就是使用三角形面片的顶点集合。.stl文件创建过程如下:1) Revit 模型 对象导出 DWG 文件(选择 ACIS 实体);2) AutoCAD 打开 DWG 文件并输出 STL 文件。最后通过 Matlab 获取 STL 文件 的三角形面片顶点,结果如图2(b)所示。



2.1.1 去噪

在获取点云数据的过程中,建筑工地上不可避免地存在一 些建筑材料和其他无关对象,同时大量的振幅噪声和离群点存 在于三维数据中,因此要先经过去噪处理再进行配准操作。对 噪声点的检测与去除有下面4种方式^[5]:1)对于一些明显的 噪声点,直接观察并手动删除;2)曲线判别法:利用截面数 据的起点和终点拟合出曲线,通过最小二乘法计算各数据点到 曲线的距离,若超过允许的距离,则视为噪声点;3)角度偏 差法:计算判别点在扫描方向上与前后两点之间的夹角是否满 足要求;4)弦高偏差法:以判别点前后两点做直线,计算判 别点到直线的距离,若超过此方法允许的最大距离,则视为噪 声点。建筑构件的三维扫描数据属于扫描线点云,因此本文在 手动删除明显噪声后,利用弦高偏差法实现测量点云数据的去 噪,结果如图3(b)所示。



2.2 配准

点云配准的实质是求取刚体变换矩阵,即已知一个物体在 不同坐标系下的两个点集 P 和Q,经过旋转变换 R 和平移变换 T 后,归一到同一坐标系,使得对应点的距离平方和 F(R,T) 最 小,即:

min
$$F(R,T) = \sum_{i=1}^{N} \|Q_i - (RP_i + T)\|^2$$
 (1)

配准过程分为两个主要步骤:初始配准和精配准,初始配 准通过计算两点集的位姿,得出粗略配准结果,以加快精配准 速度。本文分别利用 PCA 和基于 K-D 树的 ICP 算法实现初始 配准和精配准。

2.2.1 初始配准

初始配准常用于缩小两点云数据的平移距离和旋转角度,防止精配准趋于局部最小值^[6],但配准精度不高。本文使用 PCA (principal component analysis,主成分分析)算法对 3D 模型对象(M)和扫描构件(S)点云进行初始配准,PCA可 以减少数据集的维数,是一种数据集简化分析方法,在简化的 同时保留数据集对方差贡献最大的特征。

设点集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, x$ 为其均值,则点集 X 的协方差矩阵为:

$$\mathbf{COV} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \{ (x_i - \bar{x}) (x_i - \bar{x})^T \}, i = 1, 2, 3 \cdots N \quad (2)$$

变换矩阵通过奇异值分解算法(SVD)求取,对协方差矩 阵 COV进行特征向量分解,得到的正交特征向量即为点集的 主轴方向,设模型点云和实际构件点云的特征向量为 U_M , U_s 则点集按主轴配准的旋转变换矩阵(\mathbf{R}_c)和平移变换矩阵 (\mathbf{T}_c)如下:

$$\boldsymbol{R}_{C} = \boldsymbol{U}_{M} \times \boldsymbol{U}_{S}^{-1} \tag{3}$$

$$\mathbf{T}_{C} = \bar{x_{M}} - R_{C} \times \bar{x_{S}} \tag{4}$$

模型点云和实际构件点云初始配准后的结果如图 4 (b) 所示。



2.2.2 精配准

完成粗配准后,需要更精准的配准来保证误差检测的准确 性,通常采用基于自由形态曲面的 ICP 算法来实现^[7],但该方 法迭代收敛速度较慢,需要大量时间求取最近点,因此要提高 ICP 算法配准速度,就在于减少求取最近点的时间。本文将 K-D 树引入 ICP 算法^[8]以加快传统 ICP 算法计算的速度。

K-D树属于二叉树的特殊情况,其每个节点为k维点,此 方法能够快速而准确地找到判别点的近邻,基于 K-D 树的配 准流程如图 5 所示。



首先建立 K-D 树, 通过以下步骤完成最近邻搜寻:

1) 搜索 K-D 树的所有节点,搜寻满足目标点要求的节点,过程如下:顺着根节点搜索其子节点,不断递归扫描所有 子节点,当子节点为空,或者搜寻的次数达到设定上限,找出 所有节点中距离查询点最近的子节点,则最近点一定位于以查 询点为中心且经过子节点的圆域内;

2) 在找到距离查询点最近的子节点后,假设圆域内点集包含 m 个最近邻点,计算出所有最近邻点到查询点的距离,将距离最短的点作为 K-D 树搜索结果;若没有找到最近点,则显示错误。

加入 K-D 树的 ICP 改进算法的时间复杂度为 $o(N_M \lg N_S)$, 而原始 ICP 算法的时间复杂度为 $o(N_M N_S)$, 显而易见,利用 K-D 树查找对应点可以明显加快 ICP 算法的配准速度。

模型点云和实际构件点云配准后的结果如图 6 所示。



图 6 配准后点云

2.3 构件质量评估

完成两个点云集的配准后,进行构件的尺寸精度判断。构件的质量评估分为两部分:检测偏差和偏差的量化。首先使用 直接观察法判断偏差位置,然后通过均方根值 RMS (root meam square)对误差进行量化。表 1 为本文提出的构件误差 量化评估算法流程。

長1	量化	评作	古算	法	流	程
----	----	----	----	---	---	---

输入	过程	输出
配)准	1. 根据误差分析结果定义构件局部检测范围	构件局部
<u></u> 乱在 点云	2. 搜索包含局部构件的点云集	特性分析
	3. 计算每部分的 RMS 值	结果

2.3.1 误差分析

制造业中,误差分析是检测缺陷的关键技术,研究表明计 算机技术促进建筑构件的误差检测,本文利用一种基于距离的 误差分析方法,直接观察出构件潜在误差,一个构件的误差分 析结果如图7虚线圈所示。



图 7 点云中的轴管缺陷

2.3.2 局部误差检测

在欧式几何中,点 $P_M = (x_M, y_M, z_M)$ 和对应点 $Q_s = (x_s, y_s, z_s)$ 之间的距离 *RMS* 表示为:

 $d(\hat{P}_{M},\hat{Q}_{s}) = \sqrt{(x_{M}-x_{s})^{2} + (y_{M}-y_{s})^{2} + (z_{M}-z_{s})^{2}}$ (5) 由于整体构件的均方根值 *RMS* 对局部误差量化不确切, 需要定义一个基于领域的度量范围,将实际构件点云和模型点 云分成相对应的小范围集群,再通过局部均方根值检测误差。 根据误差分析结果定义 3D 模型检测位置,对于点集 P 中的一 点 P_i,用 K-D 树搜寻近领域在点集 Q 中求出与之欧氏距离最 近的 3 个点,此三点按式(6)做一个三角面,

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0$$
(6)

点 P_i 到此三角面的距离记为 e_i ,则局部 RMS 为:

$$RMS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} e_i \tag{7}$$

3 实验验证与问题分析

3.1 实验设备

为了验证提出的检测和评估方法的可行性,设计制造了一 组轴管,实验研究了轴管的一个特定分支,如图 8 (a) 所示。 轴管末端的法兰接头可以旋转任意一个角度,如图 8 (b) 所示。

考虑到局部检测算法的可实施性,本文采用 30×30×30 cm³ 大小的模型将法兰接头分为 1、2、3 三部分,如图 8 (c) 所示。点云数据通过 FARO 三维激光扫描仪 LS 840 获取,这 是一款基于相位差的免接触测量设备,可旋转 360°,并对扫描 仪视线内的任何物体进行自动测量。该设备的技术参数如表 2 所示。



图 8 用于实验的轴管及末端法兰

表 2 FARO LS 840 技术参数

激光特性	波长	785 nm
旺政	范围	0.6 \sim 40 m
叱芮	精度	0.6 mm
加色苏国	水平	360°
仍用把回	竖直	320°
扫描速度		120 000 Hz

3.2 实验结果与分析

如图 8(b)所示,改变轴管法兰接头的旋转角度θ,计算 不同旋转角度下的轴管末端法兰点云与模型点云的误差 *RMS*。 结果如表 3 和图 9 所示。

在图 9 中可以看到,代表平均误差的 RMS 值随着角度偏移的增加而增大,然而当角度误差小于 15°,每个位置的误差基本为一恒定常量。

为了精确检测误差的角度,本文采用文献[9,10]中基





于霍夫变换的线性回归分析方法,还是以轴管末端法兰为例,如图 10 所示,设置法兰的旋转角度 $\theta = 30^{\circ}$,实验结果如表 4 所示,其中 θ 由线性回归方程 $\theta = a_0 + a_1 RMS$ 求得。

表 3 不同角度和不同位置的实验结果

旋转角度	RMS/m				
/ (°)	#1	# 2	# 3		
0	0.028369	0.029423	0.024574		
5	0.030 433	0.027 646	0.026 358		
10	0.033 062	0.032 02	0.033 339		
15	0.035 997	0.035 77	0.035 725		
30	0.040 289	0.040 421	0.055 234		
45	0.045 668	0.046 307	0.063 474		
90	0.059 326	0.063 373	0.116 397		

表 4 30°下的检测结果

位置	角度	a_0	a_1	RMS	结果/ (°)	偏差/%
1	30	-86.07	2926.4	0.040	31.83	6.09
2	30	-70.84	2515.7	0.040	30.85	2.83
3	30	-20.96	969.7	0.055	32.60	8.66



(上接第4页)

- [23] 高凤岐,连光耀,黄考利,等.基于半实物仿真的电路板故障注入系统设计与实现[J].计算机测量与控制,2009,17 (2):275-277.
- [24] 聂 磊, 冯金富, 刘 安, 等. ARINC429 总线的故障注人测试 方法 [J]. 电光与控制, 2014, 21 (10): 85-88.
- [25] 唐志敏,董 剑,吴智博,等. PCI 总线故障注入器的研究与设计 [J]. 计算机工程与设计,2012,33 (1):173-179.
- [26] 李天梅, 胡昌华, 周 鑫. 基于故障传递特性的位置不可访问故 障注人方法 [J]. 航空学报, 2011, 32 (12): 2277-2286.
- [27] 范 英,田志成,基于 Bayes 方法的小子样可靠性分析 [J].机 械强度,2014,28 (6):463-466.
- [28] 张西山,黄考利,闫鹏程,等.小子样复杂装备系统测试性评估中的验前参数值确定方法[J]. 航空动力学报,2014:1968-1973.

实验结果表明该方法取得了较高的精确度,适用于缺陷检 测与误差量化。

4 结束语

本文提出的一种基于点云的建筑构件缺陷检测与误差量化 的方法,包括 BIM 模型的格式转换、点云配准与误差评估。 最后通过实验验证了该方法的有效性与准确性,且误差量化的 结果与实际值的偏差小于 9%,实验结果同时表明局部 RMS 和构件旋转角度之间存在线性关系。但是,对于精密仪器设备 来说,误差检测的结果还不够精准,需要进一步研究,提高误 差量化精度。

参考文献:

- Akinci B, Boukamp F, Gordon C, et al. A formalism for utilization of sensor systems and integrated project models for active construction quality control [J]. Automation in Construction, 2006, 15 (2): 124-138.
- [2] Bosche F, Haas C T. Automated retrieval of 3D CAD model objects in construction range images [J]. Automation in Construction, 2008, 17 (4): 499-512.
- [3] Bosché F. Plane-based registration of construction laser scans with 3D/4D building models [J]. Advanced Engineering Informatics, 2012, 26 (1): 90-102.
- [4] Nahangi M, Haas C T. Automated 3D compliance checking in pipe spool fabrication [J]. Advanced Engineering Informatics, 2014, 28 (4): 360-369.
- [5]时可可,潘为民,郭志强,等.大型定子叶片铸件的数字化测量 及误差评定[J].图学学报,2014,35(3):407-411.
- [6] 曾 锋,杨 通,逆向工程点云数据采集系统设计及应用 [J]. 计 算机测量与控制,2012,20 (1):276-277.
- [7] 邹际祥.基于 kd-tree 加速的点云数据配准技术研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2013.
- [8] 刘丰华.复杂模型二维点云自动配准技术的研究 [D]. 天津: 天 津大学,2013.
- [9] Rabbani T, et al. An integrated approach for modelling and global registration of pointclouds [J]. Photogrammetric engineering and remote sensing, 2007, 61 (6): 355-370.
- [10] Ahmed M, Haas C, Haas R, Automatic detection of cylindrical objects in built facilities [J]. Computer Civil. Engineering, 2014, 28 (3): 04014009.
- [29] 张西山,黄考利,闫鹏程,等.基于仿真数据的小子样复杂装备
 - 系统测试性综合评估 [J]. 计算机测量与控制,2014,22(4): 1175-1177.
 - [30] 邓 岚. 基于 LRM 结构的雷达信号模拟器设计与可靠性分析 [D].成都:电子科技大学,2012.
 - [31] Kanda R, Jain K. Thermal Management of Low Volume Complex Electronic Systems [A] Proceedings of the International Conference on Research and Innovations in Mechanical Engineering [C]. Springer India, 2014: 519-533.
 - [32] 石君友,康 锐.基于通用充分性准则的测试性试验方案研究 [J].航空学报,2005,26(6):691-695.
 - [33] 朱烈光. 浅谈 RS-422 与 RS-485 总线 [J]. 高科技与产业化, 2010 (3): 81-82.