

文章编号: 1671-7848(2014)01-0037-04

基于改进 ICP 算法的点云自动配准技术

钟莹, 张蒙

(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: 在零件的型面检测过程中, 通常有数据采集、曲面重构、曲面配准和误差求取几个步骤。其中, 曲面之间的配准是检测中关键的一环。针对传统的经典 ICP (Iterative Closest Point) 算法在配准过程中受噪声干扰大、鲁棒性差的缺点, 在应用点云主方向贴合的粗略配准基础上, 以经典的 ICP 算法为基础, 提出了点云数据的欧氏距离阈值去噪和点云的方向向量夹角阈值两种方法改进 ICP 算法, 并应用改进算法作为点云之间的精确配准算法。对于经过初始配准的点云数据使用欧氏距离阈值法剔除点云间点对的噪声, 并经点云各点间的方向向量夹角阈值进行对应点采样, 提高了传统 ICP 算法的效率和精度。经飞机和汽车零件点云配准实验验证, 本算法的配准误差在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 内。算法具有设计简洁, 响应快速的特点, 有实际工作意义。

关键词: 误差检测; 点云配准; 迭代最近点算法; 逆向工程

中图分类号: TP 391.76

文献标志码: A

Automatic Registration Technology of Point Cloud Based on Improved ICP Algorithm

ZHONG Ying, ZHANG Meng

(The State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: There are four steps in part surface error detection: data collection, surface reconstruction, surfaces registration and error calculation. Surface registration is the key step. According the defect of ICP (Iterative Closest Point) algorithm, this paper proposes an improved ICP algorithm based on sample points taken by point-to-point distance and angle between the direction vectors of two points. Firstly, Principal Component Analysis (PCA) is introduced to register two point clouds roughly. Then it will eliminate the noisy points from point cloud using Euclidean distance threshold, and sample points by point-to-point distance and angle between the direction vectors of two point clouds. The effect of the algorithm is verified in the applications. The efficiency and accuracy is improved. Experiments show that the efficiency and accuracy is improved. The accuracy of registration between measuring points and the standard model is in allowing error range ($\leq 1 \mu\text{m}$). The algorithm is simple and fast, and has significant usage in practical work.

Key words: error detection; point cloud registration; iterative closest point; reverse engineering

1 引言

现代工业生产领域中, 日益精密的零件生产技术对生产过程的控制和误差检测提出越来越高的要求。尤其是在飞机、汽车等复杂系统中, 零部件的精度对最终产品的完成有很大的影响。相对于传统误差检测的费时费力, 利用计算机三维图形技术进行零件产品和设计模型之间的自动配准计算零件的生产误差, 在效率方面有极大提高。零件的误差检测中, 配准技术是其中的一项基础技术, 是实现零件检测、模型评估的前提条件。目前, 依赖于仪器的手动配准和外部标定配准研究较为成熟, 但此类

配准方法自动化程度较差, 容易引入人为干扰。针对上述方法的缺点, 零件曲面的自动配准研究越来越受到重视。

从配准效率和精度两方面考虑, 本文采用主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 算法进行粗略配准, 快速得到两幅大致重合的点云。然后, 利用经由阈值改进的 ICP 算法进行点云数据的精确配准。经验证, 本文算法在精度和效率上满足实际应用要求。

2 粗略配准

零件型面大多属于自由曲面, 曲面整体变形较

收稿日期: 2012-10-22; 收修定稿日期: 2013-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51105272)

作者简介: 钟莹(1976-), 女, 天津人, 副教授, 博士, 主要从事精密测试技术, 微纳器件及其测试技术, 微纳米光学等方面的教学与科研工作。

大且存在局部陡峭变形,难以精确配准。配准过程中,局部大变形的出现会放大部分曲面误差,同时压缩大变形处的误差。为此,文献[1-2]提出了基于遗传算法与最小二乘法相结合模型配准方法以及基于时间匹配准则的模型配准方法进行处理。该方法收敛性好,但对于巨量点云数据的配准精度较差。文献[3]采用径向基函数[4]的方法对模型进行变形,用形状上下文来描述点之间的形状相似性,从而实现形状最佳匹配意义上的三维重构,此方法较为依赖于经验选择基函数的参数。文献[5-7]以最近点迭代(ICP)算法为基础,针对点云配准算法中的控制点集选取问题在迭代最近点算法的目标函数中引入预变换函数建立考虑弯扭变形的零件模型配准目标函数。文献[8]研究了带脚标的基于几何哈希法的 ICP 算法,实现两组散乱点云的配准。文献[9]提出了一种基于特征点的改进 ICP 算法。上述方法都是针对 ICP 算法的缺点提出的改进方法,主要是对点云自身进行特征提取,应用于点云具有明显几何特征的情形下,适用范围受限。除 ICP 法外,文献[10]提出了一种不用 ICP 进行点云匹配的算法;文献[11]提出了运用矩和曲面的固有特性进行几何曲面匹配的算法。上述方法考虑了点云数据的三维不变量和局部特征,但由于其特殊性使应用受到限制。

ICP 算法精度极高但对运算初值的选取要求严格,若初值选择不合适,就会使迭代不能收敛到全局最优配准结果,造成匹配失败。因此粗略配准是必要的步骤。

从配准的效率和准确性考虑,本文在进行点云数据的粗略配准时采用主成分分析法 PCA。

PCA 是一种数据集简化分析方法,用于减少数据集的维数,并保留对方差贡献最大的特征。设点集 $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}$ 是 n 维数据,求取其均值 \bar{P} 和协方差矩阵 cov 。对矩阵 cov 进行特征量分解,得到的正交特征向量即作为点集 P 的三坐标轴 XYZ 。以均值 \bar{P} 为坐标系的原点,建立点云的参考坐标系。本文将 2 幅点云的参考坐标系调整到一致,就达到了粗略配准的目的。然而,有可能出现坐标系一致但坐标轴方向相对的情况,需要建立最小包围盒来测试两片点云。最小包围盒可以将复杂的图形转化为简单的图形;同时,可以将点云转为具有体积实体。设定一定的阈值 K ,并求取 2 幅点云的最小包围盒重合度 f 。当 $f > K$ 时则说明两点云基本重合,反之反转坐标轴方向。

3 精确配准

通过粗略配准,2 幅点云大致重合,但配准精度仍然远远达不到实际应用的要求。故还应该对点

云数据进行精确配准,以缩小配准误差。ICP 算法的基本原理是利用最小二乘的优化思想,通过计算使下列函数最小化的 R 和 T ,得到点云之间的配准矩阵。

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

式中: P_i 为源数据的初始点集; Q_i 为目标数据点集中对应 P_i 的最近点; R 为 3×3 的旋转矩阵; T 为 3×1 的平移矢量。 $F(R, T)$ 表示的是在源点集经过旋转和平移后,其点集中每一个点与目标点集中的对应点的距离平方和。当 $F(R, T)$ 达到最小时,即满足了最小二乘的要求。

本文采用 KD-tree (K Dimension tree) 进行最近邻搜索以提高对应点的查找速度,并且用阈值法选取初值,以此来改进 ICP 算法,可以提高初值的匹配准确度。为提高初值准确度,采用欧氏距离阈值和方向向量阈值。

3.1 欧氏距离阈值

点云数据采集,不可避免地将引入噪声点影响最后的配准结果,欧氏距离阈值法可剔除噪声点,提高初值选择成功率。

设有点云 P 和 Q , 对 P 中的一个点 P_i , 搜索 Q 中与 P_i 欧氏距离最近的 3 个点,分别为 q_1 、 q_2 和 q_3 ; 若 P_i 与 Q_j ($j=1, 2, 3$) 的距离超出阈值 T ($T = m \times d$, 其中 m 为选择系数, d 为点云中相邻点间的平均距离), 则对应点查找失败; 否则以这 3 个点作三角形 S , 求出 P_i 到三角形 S 的垂足 q , P_i 和 q 就构成 P 和 Q 的对应点。噪声点的剔除遵照以下两条规则:

- 1) 两幅点云的对应点的距离不应过大。
- 2) 若 P 和 Q 构成对应点集, 则 P 和 Q 的空间拓扑关系应当一致。

由于点云的位姿关系,点云的边界点往往容易形成多个对应点对,也应当予以剔除。

3.2 方向向量阈值

经过欧氏距离阈值可基本剔除点云数据的噪声点。下面使用点的方向向量夹角判断是否为对应点,提高初值选择的正确率。

给定点 $p_i = (x_i, n_i)$, 我们通过它的邻近点集 $\{q_j = (x_j, v_j)\}$ ($1 \leq j \leq K$) 求出 p_i 点的近似切平面, 然后求 p_i 点的近似法矢量。

由以上方法得到通过欧氏距离阈值剔除过大距离后的对应点集的各点法矢量。为匹配点的法向量夹角设定阈值 θ , 即法向量夹角在 θ 以下的点可以进行最小距离函数的判定, 否则剔除此对对应点。步骤如下:

Step 1 选取经过欧式距离阈值判定后得到的两对应点集 P' 和 Q' 。通过邻域协方差分析法计算

各对应点对法矢量。

Step 2 将对应点法矢量单位化，并求出两矢量的夹角 α 。如果 α 大于设定的阈值 θ ，则剔除这一对点对，否则保留。

3.3 改进的 ICP 算法

基于上文的分析，本文提出了改进的 ICP 算法步骤如下：

Step 1 在点集 P 中选择初始点集 P_{i0} 。

Step 2 求点集 P_{i0} 在目标点集 Q 中最近的点集，使用欧氏距离阈值法剔除噪声点得到点集 Q_{i0} 。点集 P_{i0} 和 Q_{i0} 构成对应点集。

Step 3 对点集 P_{i0} 和 Q_{i0} 应用方向向量阈值法选定运算初值点集 P_{i1} 和 Q_{i1} 。

Step 4 应用 SVD (Singular Value Decomposition) 法求得点集 P_{i1} 和 Q_{i1} 之间的旋转矩阵 R 和平移矢量 T 。

Step 5 计算 $P_{i2} = R_1 P_{i1} + T_1$ ，也即是数据点集 P_{i1} 经过一次坐标变换后所得到的数据点集 P_{i2} ，然后重复 Step 3 ~ Step 5，直到满足条件：

$$\begin{cases} d_k - d_{k+1} < \varepsilon, \\ d_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \| Q_{ik} - P_{ik} \|^2 \end{cases} \quad (2)$$

其中： R_k 和 T_k 为第 k 次迭代求得的旋转矩阵和平移矢量； ε 表示的是大于零的阈值，判断迭代是否收敛，收敛则迭代结束。

4 实验验证

本算法主要是针对工业生产中的汽车和飞机零件的复杂曲面检测所设计，因此算法的验证主要使用汽车后视镜点云数据、汽车车身零件点云和密集涡轮叶片点云进行仿真实验。

本实验的实验平台为 CPU 主频 1 GHz，内存 512 M 的 Windows XP 系统。

实验一使用汽车后视镜零件点云数据，每幅点云 5 535 个数据，配准过程如图 1 所示。

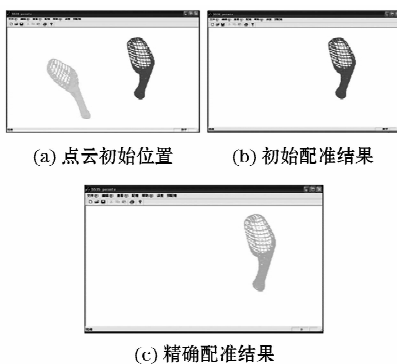


图 1 后视镜点云的配准

Fig. 1 Rearview mirror point cloud registration

由图 1 可知，对于较为密集的光滑曲面点云，

本文算法配准误差为 $\pm 0.031 \mu\text{m}$ ，用时 9 218 ms，迭代 5 次。

实验二使用汽车车身零件点云数据，每幅点云 4 355 个数据，配准过程如图 2 所示。

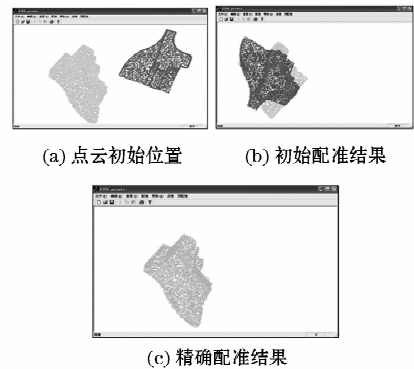


图 2 汽车发动机点云的配准

Fig. 2 Vehicle engine point cloud registration

由图 2 可知，初始配准可拉近两点云距离，为 ICP 算法精配准提供较好初值，配准误差 $\pm 0.004 \mu\text{m}$ ，用时 5 488 ms，迭代 7 次。

实验三使用密集涡轮叶片零件点云数据，每幅点云 8 000 个数据，配准过程如图 3 所示。

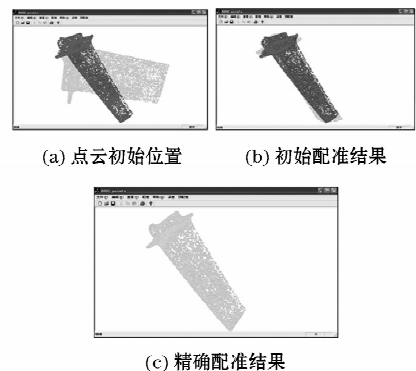


图 3 密集涡轮叶片点云的配准

Fig. 3 Dense turbine blade point cloud registration

由图 3 可知，对于密集点云配准，ICP 算法可以发挥自己的优点，配准误差 $\pm 0.014 \mu\text{m}$ ，用时 11 666 ms，迭代 4 次

表 1 改进算法与原始算法配准性能比较

Table 1 The performances comparison between the improved algorithms and the original algorithm

图形	点数	时间/ms		误差/ μm	
		原算法	改进后	原算法	改进后
后视镜	5 535	28 631	9 218	0.28	0.031
车身零件	4 355	13 426	5 488	0.011	0.003
涡轮叶片	8 000	407 591	11 666	0.009	0.014

5 结论

本文根据汽车和飞机零件误差检测中的实际需要提出了针对汽车和飞机零件曲面的点云自动配准

算法。在经典 ICP 算法的基础上引入阈值法,提高了点云的查找速度和匹配精度,提高了算法效率。

经汽车和飞机零件点云配准仿真实验表明:经过改进的 ICP 配准算法具有较好的匹配效果,对点云数据的配准误差在 $\pm 1 \mu m$ 之内,满足了实际应用的要求。

参考文献 (References):

- [1] 武殿梁,黄海量,丁玉成,等. 基于遗传算法和最小二乘法的曲面匹配[J]. 航空学报,2002,23(3):285-288. (Wu Dianliang, Huang Hailiang, Ding Yucheng, *et al.* Surfaces matching algorithm based on genetic algorithm and least square criterion [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2002, 23(3): 285-288.)
- [2] 武殿梁,洪军,丁玉成. 测量点群与标准曲面的匹配算法研究[J]. 西安交通大学学报,2002,36(5):500-503. (Wu Dianliang, Hong Jun, Ding Yucheng. Surfaces matching algorithm based on the least time criterion [J]. *Journal of Xian Jiaotong University*, 2002, 36(5): 500-503.)
- [3] 薛峰,丁晓青. 基于形状匹配变形模型的三维人脸重构[J]. 电子学报,2006,34(10):1896-1899. (Xue Feng, Ding Xiaoqing. 3D reconstruction of human face based on shape match morphing model [J]. *Chinese journal of electronics*, 2006, 34(10): 1896-1899.)
- [4] Szeliski R, Lavallee S. Matching 3D anatomical surfaces with non-rigid deformation deformations using octree-splines [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1996, 18(2): 171-186.
- [5] 程云勇,张定华,卜昆,等. 涡轮零件形状检测中的模型配准控

(上接第 36 页)

参考文献 (References):

- [1] 田大鹏,吴云洁,刘晓东. 高精度电机伺服系统控制综合方法[J]. 电机与控制学报,2010,14(7):66-74. (Tian Dapeng, Wu Yunjie, Liu Xiaodong. Synthesis methods of high precision motor servo system control [J]. *Electric Machines and Control*, 2010, 14(7): 66-74.)
- [2] 刘强. 高性能机械伺服系统运动控制技术综述[J]. 电机与控制学报,2008,12(5):603-609. (Liu Qing. Survey on motion control technologies of high performance mechanical servo systems [J]. *Electric Machines and Control*, 2008, 12(5): 603-609.)
- [3] Ashwani K P, Jinhyoung O, Dennis S B. On the lugre model and friction induced hysteresis [C] // Proc. of the 2006 American Control Conference. Minneapolis; MIT Press, 2006: 3247-3252.
- [4] De Wit C C, Olsson H, Astrom K J, *et al.* A new model for control of systems with friction [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, 40(3): 419-425.
- [5] 姚建勇,焦宗夏. 改进型 LuGre 模型的负载模拟器摩擦补偿[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(7):812-815. (Yao Jianyong, Jiao Zongxia. Friction compensation for hydraulic load simulator based on improved LuGre friction model [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36(7): 812-815.)
- [6] Mezghani D, Andoulsi R, Mami A, *et al.* Bond graph modeling of a photovoltaic System feeding an induction motor pump [J]. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2007, 15(10): 1224-1238.

- 制点集选取 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(11): 240-246. (Cheng Yunyong, Zhang Dinghua, Bo Kun, *et al.* Control point set of model registration selected in turbine part shape detection model [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(11): 240-246.)
- [6] 蒋睿嵩,张定华,张顺利,等. 带变形涡轮叶片零件精确配准算法研究[J]. CT 理论与应用研究,2009,18(1):35-40. (Jiang Ruisong, Zhang Dinghua, Zhang Shunli, *et al.* Precise registration algorithm on turbine parts with deformation [J]. *Computerized Tomography Theory and Applications*, 2009, 18(1): 35-40.)
- [7] 周丽敏,卜昆,董一巍,等. 基于简化点云带动的涡轮零件快速配准技术研究[J]. 计算机集成制造系统,2012,18(5):988-992. (Zhou Limin, Bo kun, Dongyiwei, *et al.* Registration of turbine parts quickly technology research based on a simplified point cloud [J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2012, 18(5): 988-992.)
- [8] 朱延娟,周末水,张丽艳. 散乱点云数据配准算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(4):475-481. (Zhu Yaojuan, Zhou Laishui, Zhangliyang. Scattered point cloud data registration algorithm [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2006, 18(4): 475-481.)
- [9] 戴静兰,陈志杨,叶修梓. ICP 算法在点云配准中的应用[J]. 中国图像图形学报. 2007, 12(3): 517-521. (Dai Jinglan, Chen Zhiyang, Yexiuxin. The application of ICP algorithm for point cloud registration [J]. *Journal of Image and Graphics*. 2007, 12(3): 517-521.)
- [10] Helmut P, Stefan L, Michael H. Registration without ICP [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2004, 95(1): 54-71.
- [11] Ko K H, Takashi M, Nicholasm, *et al.* Shape intrinsic properties for free-form object matching [J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2003, 3(4): 325-333.

- [7] 刘强,尔联洁,刘金琨. 参数不确定机械伺服系统的鲁棒非线性摩擦补偿控制[J]. 自动化学报,2003,29(4):628-632. (Liu Qiang, Er Lianjie, Liu Jinkun. Robust nonlinear friction compensation of mechanical servo system with time variable parameters [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(4): 628-632.)
- [8] Zhang W J, Li P Y, Xu H Z. An active disturbance rejection friction compensation in permanent magnet synchronous motor servo system [C] // Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. Yantai: IEEE Press, 2011: 3715-3719.
- [9] Ren Y, Liu Z H, Zui R. Adaptive terminal sliding mode control of opto-electronic stabilized platform based on acceleration feedback [C] // 2012 3rd International Conference on Manufacturing Science and Engineering. New Delhi, 2012: 523-528.
- [10] 李永林,沈燕良,李小涛,等. 基于 LuGre 模型的飞机助力器极限环振荡仿真研究[J]. 系统仿真学报. 2007, 19(23): 5529-5532. (Li Yonglin, Shen Yanliang, Li Xiaotao, *et al.* Study on limit cycles oscillations of aircraft hydraulic booster based on LuGre model [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(23): 5529-5532.)
- [11] C de Wit Carlos, P Lischinsky. Adaptive friction compensation with partially known dynamic friction model [J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 1997, 11(1): 65-80.
- [12] Chen C A, Chiang H K, Lin B R. The novel adaptive sliding mode control for current sensorless synchronous reluctance motor speed drive [C] // Proc. of IEEE International Conference on Industrial Technology. Chengdu: IEEE Press, 2008: 1-6.