

多视点云拼接中的 ICP 算法优化

姚晓山¹, 刘健鑫², 柯 维²

(1 空军雷达学院 军通系, 湖北 武汉 430019; 2 海军工程大学 船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 为了提高多视点云拼接算法的稳定性及其拼接的精度和效率, 对现有的 ICP 算法进行了优化, 提出了基于最小二乘法的混合定位点云预拼接方法, 对两块点云进行了粗略拼接, 获取了两块点云中可匹配部分的对应点集, 并给出了具体的算法, 进而提出了基于总体最小二乘法的点云精确拼接算法, 对两块点云进行了精确拼接, 实现了现有 ICP 算法的优化, 保证了拼接的全局收敛性和算法的稳定性, 减少了算法的迭代次数, 提高了点云拼接的精度和效率。

关键词: 多视点云; 点云拼接; 定位点; 最小二乘法; 总体最小二乘法

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)08-0094-04

Improved ICP Algorithm in Multi-view Point Clouds Splicing

YAO Xiao-shan¹, LIU Jian-xin², KE Wei²

(1 Dept. of General Ordnance Equipment, Air Force Academy of Radar, Wuhan 430019, China;

2 College of Naval Architecture and Power, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: How to improve the stability and accuracy of the algorithms for point clouds splicing was studied, and a hybrid positioning point clouds pre-splicing algorithm based on least square method was advanced, and the detailed algorithm was given, and a precise algorithm based on total least squares method was presented, and the optimization of existing ICP algorithms was achieved, and the global convergence and the stability of the algorithm were ensured, and the number of iterations was reduced, and the accuracy and efficiency of the algorithm was improved.

Key words: multi-view point clouds; point clouds splicing; positioning point; least squares method; total least squares method

1 引言

点云拼接是航空、航天、汽车、船舶、移动机器人导航、计算机视觉、指纹识别等众多科研领域的重要研究课题, 是逆向工程 CAD 建模中的关键环节和研究热点问题之一。

在重建实物原型的数字化模型过程中, 需要在实物原型完整点云数据的基础上进行模型重建, 但在实际的测量过程中, 由于实物的体积超出三坐标测量设备行程范围、实物结构形状造成干涉、死角、光线无法到达等原因, 无法实现在同一坐标系下通

过一次测量得到实物的完整点云数据, 即需要对多个局部相互重叠的子区域进行分块测量, 从多个视点分别获取实物不同侧面的点云数据, 然后将多视点云数据进行拼接, 并对两块点云的重叠部分进行数据融合, 从而得到完整的反映实物全貌的三维点云数据。多视点云数据拼接的结果为后期的数据分块、曲面重建等操作提供完整的实物点云数据模型, 其拼接速度、拼接精度等将直接影响后期数字化重建模型的质量。

近年来, 人们提出了多种点云拼接算法^[1-6]。目前, 最常用的点云拼接方法基本上都是在文献[1]算

法的基础上发展而来的,如文献[3-6]基于点到面距离的ICP算法将两块待拼接点云之间的对应转换为点与平面之间的对应,但在实际操作中,这种对应关系往往难以正确建立,容易造成迭代计算的结果不收敛,难以得到正确结果。

为了提高算法的稳定性和点云拼接的效率,提出了基于最小二乘法的混合定位点云预拼接方法,并给出了精确拼接算法,实现了ICP算法的优化。

2 点云拼接优化算法

目前国内外的点云拼接技术一般可分为两步:预拼接和精确拼接。本文主要研究的是直接对点云数据进行拼接的方法。

在预拼接阶段,提出了基于最小二乘法的混合定位点云方法,先对两块点云进行粗略拼接,即将两块点云大致重合在一起,从而得到两块点云在同一坐标系下的初始位置,并获取两块点云中可匹配部分的对应点集;在精确拼接阶段,本文提出了基于总体最小二乘法的点云精确拼接算法,对两块点云进行精确拼接,直到两块点云的拼接精度符合预定要求。

2.1 定位点的设置原则

由于拼接精度与定位点的测量精度、定位点的位置选取有关,为了保证拼接的精度,定位点的选择及测量遵循以下原则^[7]:

- (1) 为了减小测量误差对点云拼接精度的影响,定位点的位置选择应尽可能远。
- (2) 变动实物或测量设备位置后,需要重复测量定位点,应该保证两次都能够方便地测量到尽可能多的定位点。
- (3) 定位点的位置应尽量选择探头容易接触的地方,定位标记号应尽可能小。
- (4) 在测量定位点时,应尽快地在同一环境中测量完,避免温度误差。

在实际点云拼接过程中,由于存在测量误差,两块点云数据中的标志点的相对位置不可能完全一致,得到的变换矩阵可能导致被变换物体的变形。为求得最佳的变换矩阵,保证点云拼接精度,本文根据实物结构、材料等属性,设置不同的定位点,为精确拼接提供更多的初始对应点:

- (1) 对于面积较大,材质较硬的实物,可直接在实物上粘上工具球或硬点等作为测量定位点。
- (2) 对于无法使用工具球和硬点的情况(如待测实物上无法或不允许固定工具球),可利用待测实

物本身具有的几何特征(如圆环、球面、抛物面等),即可以确定相应的特征点(如圆心、球心、焦点等)。

2.2 预拼接

二次曲面的一般方程可表示为

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Eyz + Fxz + Gx + Hy + Iz + J = 0 \quad (1)$$

式中, $A, B, C, D, E, F, G, H, I, J$ 是自变量为不同几何特征中特征点(定位点)相关参数(如特征点的三维坐标、球面的半径等)的函数,最小二乘目标函数可设为

$$F(A, B, C, D, E, F, G, H, I, J) = \sum_{i=1}^N (Ax_i^2 + By_i^2 + Cz_i^2 + Dxiy_i + Eyi z_i + Fxi z_i + Gxi + Hyi + Izi + J)^2 \quad (2)$$

根据不同的几何特征,对应不同的最小二乘目标函数方程,使得最小二乘目标函数最小,从而得到特征点(定位点)的坐标值,并确定两块点云的初始定位点对。

由原始点云 P, Q 中相对应的三个定位点对得到预拼接初始变换矩阵 R_0, T_0 , 对 Q 进行变换,得到 Q^* 。从而在精确拼接前,先对两块点云 P, Q 进行了粗略拼接,获得两块点云在同一坐标系下的初始位置 P, Q^* , 为整体的点云拼接的稳定性提供了保证。

2.3 精确拼接

由于所有数据均为测量所得,不可避免地存在测量误差,即测量的数据存在扰动。最小二乘估计的基本思想是用一个范数平方最小的扰动向量 e 去干扰数据向量 b , 以校正 b 中存在的噪声,但是当 A 和 b 二者均存在扰动时,求解矩阵方程 $AX=b$ 的最小二乘法将会导致较大的方差。为了克服最小二乘法的缺点,在求解矩阵方程的时候,本文同时考虑矩阵 A 和向量 b 的扰动,不仅用扰动向量 e 去干扰数据向量 b , 而且用扰动矩阵 E 同时干扰数据矩阵 A , 以使校正 A 和 b 两者内存在的扰动,此即总体最小二乘法的思想。考虑矩阵方程:

$$(A + E)X = b + e \quad (3)$$

式(3)可以改写成

$$[(-b, A) + (-e, E)] \begin{bmatrix} 1 \\ X \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

$$(4) \text{ 记为 } (B, D)Z = 0 \quad (5)$$

式中,增广矩阵 $B = (-b, A)$ 和扰动矩阵 $D = (-e, E)$ 均为 $m \times (n+1)$ 矩阵,而 $Z = \begin{bmatrix} 1 \\ X \end{bmatrix}$ 为 $(n+1)$ 维向

量. 求解齐次方程的总体最小二乘法可以表示为如下约束最优化问题:

$$\min_{D,X} \|D\|_F^2 = \min_{D,X} \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \min_{D,X} \sqrt{\text{tr}(D^H D)} \quad (6)$$

具体步骤如下:

Step1. 在 P 与 Q^* 的重合区域中, 以特征点为圆心, r 为半径的范围内, 计算 Q^* 中每一点在 P 中的最近点, 即匹配点, 可得到 n_1 组初始匹配点对. 初始匹配点对的个数随着 r 值的减小而减少, 但拼接的精度也随之降低, 需根据工程实际需要而定;

Step2. 对两块点云中的对应点进行匹配的过程中只考虑匹配点 p_i 和 q_i ($i=1, 2, 3, \dots$) 之间是刚体变换关系的情况. 对于初始匹配点集 P 和 Q^* 中的三对匹配点, $\{p_1, q_1\}, \{p_2, q_2\}, \{p_3, q_3\}$, 其组成的三角形应是两个近似全等的三角形, 从而对匹配点对进行筛选. 即给定距离阈值 dth , 角度阈值 θth , 如果 $\|p_1 p_2 - q_1 q_2\| \leq dth$, $\|p_2 p_3 - q_2 q_3\| \leq dth$, $\|p_3 p_1 - q_3 q_1\| \leq dth$, $\|\theta_1 - \theta_1^*\| \leq \theta th$, $\|\theta_2 - \theta_2^*\| \leq \theta th$, $\|\theta_3 - \theta_3^*\| \leq \theta th$, 则该点对为正确匹配点对, 从而可获得 n_2 组精确匹配点对;

Step3. 对这 n_2 组匹配点对, 运用 SVD 矩阵的奇异值分解算法或四元数算法分解求出转换参数 R_1, T_1 . 并对 Q^* 进行变换, 得到 Q_1 , 计算目标函数方程式(6);

Step4. 如果目标函数方程式(6)小于设定的阈值 d , 则停止; 否则, 返回 Step1, 直到目标函数方程式(6)小于阈值为止.

3 实例验证

为了验证本文算法与传统 ICP 算法以及文献[6]方法的差异, 本文对某机械零件的点云数据进行了拼接实验. 如图 1 所示是部分多视点云, 图 2 所示为是拼接后的完整点云. 实验中, 该零件的第一视角的点云个数为 89 335 个, 第二视角的点云个数为 90 562 个, 第三视角的点云个数为 89 762 个.



图 1 多视点云数据

表 1 中 e_1 是指将图 1(a) 中点云数据经过变换加入到图 1(b) 中的点云数据的拼接误差, n_1 是对应



图 2 多视点云数据拼接后的完整点云数据

得迭代次数; e_2 是指将图 1(b) 中点云数据经过变换加入到图 1(a) 中的点云数据的拼接误差, n_2 是对应得迭代次数; 其中, 拼接误差是指两块点云数据所有重叠点拼接误差的平均值. $|e_1 - e_2|$ 是指用不同点云数据作基准点云数据时的偏差.

表 1 变形数据几种变换方法的误差比较

算法	e_1 (mm)	n_1	e_2 (mm)	n_2	$ e_1 - e_2 $ (mm)
ICP 算法	0.066 78	26	0.058 37	24	0.008 41
文献[6]算法	0.013 81	14	0.012 75	12	0.001 06
本文算法	0.008 93	6	0.008 27	5	0.000 66

从表 1 中的数据可以看出, 在一定的条件下, 本文给出的算法迭代 6 次后配准误差约为 0.008 mm, 拼接精度整体优于以上两种算法.

4 结束语

为了实现多视点云的精确拼接, 对现有的 ICP 算法进行了改进. 本文从工程实际出发, 提出了基于总体最小二乘法的混合定位点云拼接方法, 该算法首先在测量数据时建立相应的拼接特征, 实现了基于最小二乘法的混合定位点云预拼接, 缩小了拼接点云间的距离, 为精确拼接提供了初始位置, 并提出了基于总体最小二乘法的精确定位方法, 实现了点云的精确拼接. 该方法实现了点云的快速准确拼接, 确保了收敛到全局最小, 提高了拼接算法的稳定性和拼接的效率. 实验证明: 本文给出的算法较现有的 ICP 算法在拼接精度上有明显的提高, 多个实例下获得的拼接精度优于 0.01 mm, 完全可以满足后续误差分析的要求, 可为后续三维重建提供较精确的三维数据模型, 具有一定的工程实用价值.

参考文献:

- [1] Besl P J, Mckay N D. A method for registration of 3D shape[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, PSMI-14(2): 239-256.
- [2] Liu Y H. Improving ICP with easy implementation for free form surface matching[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(2): 211-226.
- [3] Tahie R, Sander D, Frank V H, et al. An integrated approach for modeling and global registration of point

- clouds[J]. J. Photogrammetry & Remote Sensing, 2007 (61): 355-370.
- [4] Chen Y, Medioni G. Object modeling by registration of multiple range images[J]. Image and Vision Computing, 1992, 10(3): 145-155.
- [5] Fan K C, Tsai T H. Optimal shape error analysis of the matching image for a free-form surface[J]. International Journal of Robotic and Computer-Integrated Manufacturing, 2001, 17(3): 215-222.
- [6] Ristic M, Bruijic D. Efficient registration of NURBS geometry[J]. Image and Vision Computing, 1997, 15 (12): 925-935.
- [7] David W Eggert, Andrew W Fitzgibbon, Robert B Fisher. Simultaneous registration of multiple range views for use in reverse engineering of CAD models [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1998, 69(3): 253-272.

作者简介:

姚晓山 男, (1975-), 讲师. 研究方向为计算机可视化、机械设备状态监测与故障诊断.

刘健鑫 男, (1983-), 博士研究生. 研究方向为动力装置自动化与仿真.

柯 维 男, (1984-), 博士研究生. 研究方向为工程信息可视化、振动与噪声控制.

(上接第 93 页)

- [3] 陈祥涛, 商建东. 协同设计网格平台研究[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(11): 127-130.
- [4] Michael Kwok, Johnny W Wong. Scalability analysis of the hierarchical architecture for distributed virtual environments[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2008(19): 408-417.
- [5] Sheng Pang, Changjia Chen, Chao Xu. Structure analysis of social network on multi-activities in MMOG[C] // ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management, Sanya, China, 2009.
- [6] Clark D, Tennenhouse D. Architectural considerations for a new generation of protocols[C] // ACM SIGCOMM. USA: Philadelphia, 1990.
- [7] 杜丽娟, 余镇危. 覆盖网体系结构及应用研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(28): 102-104.
- [8] 薛涛, 石美红, 王会燃, 等. 应用 P2P 网络实现基于内容的发布订阅系统[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24 (9): 89-91.

作者简介:

李 永 男, (1978-), 讲师. 研究方向为网络体系结构、覆盖网、分布式应用.