Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2023)06-0838-07

TOF点云强度特征匹配迭代最近点配准算法

韩一菲1,2,刘月1,3,郑福1,王艳秋1,孙志斌1,2

(1.中国科学院 国家空间科学中心,北京 100190; 2.中国科学院大学,北京 100049;3.辽宁大学 物理学院,辽宁 沈阳 110036)

摘 要:针对时间飞行(TOF)获取的三维点云数据噪声点多、有效目标在点云中所占比例较小的问题,提出一种适用于TOF点云数据的基于强度特征匹配的迭代最近点配准算法。首先使用强度特征进行有效区域提取,然后对有效区域进行配准,最后使用有效区域的变化矩阵对整个点云数据进行配准。实验结果表明,该方法能在不影响配准速度的情况下,有效提高真实点云配准的精确度。

关键词: 点云配准; 时间飞行; 强度信息; 迭代最近点 中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA2020610

Iterative Closest Point registration algorithm based on intensity feature matching of TOF point cloud

HAN Yifei^{1,2}, LIU Yue^{1,3}, ZHENG Fu¹, WANG Yanqiu¹, SUN Zhibin^{1,2}

(1.National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Physics, Liaoning University, Shenyang Liaoning 110036, China)

Abstract: There are many noise points in the 3D point cloud dala obtained by Time Of Flight (TOF) and the proportion of real objects in the point cloud is small. An iterative closest point registration algorithm based on intensity feature matching is proposed for TOF point cloud data. Firstly, the intensity feature is employed to extract the effective region, and then the effective region is configured. Finally, the change matrix of the effective region is utilized to register the whole point cloud data. Experimental results show that this method can effectively improve the registration accuracy of real target point cloud without affecting the registration speed.

Keywords: point cloud registration; Time Of Flight; intensity information; Iterative Closest Point (ICP)

时间飞行(TOF)技术是一种通过计算光的传播时间进行三维成像的方法。利用 TOF 进行三维成像是目前常见的三维成像方法。TOF 成像具有帧速率高,成像软件复杂度低,使用方便等优势¹¹¹,是目前的研究热点。

三维点云配准是三维计算机视觉和图像处理领域的重要研究方向。随着相关领域的快速发展,点云配准技术的应用范围越来越广,对配准精确度和速度的要求也越来越高。目前,点云配准在无人驾驶、智能机器人、人脸识别、三维重建以及医学影像学等领域有着重要的应用。点云配准主要分为粗配准和精配准2个环节:其中粗配准主要是解决精配准方法对初始位置要求高的问题,在点云相对位置完全未知的情况下进行初步的配准; 而精配准就是精确地求出点云的相对关系和变换矩阵。

1992年Besl等^[2]提出了迭代最近点(ICP)算法,是目前点云配准方向经典的精配准算法,该算法结构清晰, 实现比较容易,但在使用中配准的精确度低,算法运行时间长。为了改善这些缺点,提出了一系列ICP改进型算 法。为了优化点到点测距方法效率低的问题,Chen等^[3]提出点到线的方法;Low^[4]提出点到面的方法;Segal^[5]提 出面到面的方法,持续对测距效率进行优化。Nuechter等^[6]引入了划分树方法,OuYang等^[7]引入了泰森多边形

收稿日期: 2020-11-10; 修回日期: 2021-02-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61274024; 61474123);国家重点研发计划基金资助项目(2016YFE0131500)

图,持续对搜索效率进行优化。Chetverikov等^[8]提出了Trimmed ICP方法,可以有效处理部分重叠问题。

随着深度学习研究的深入和计算机硬件的迅速发展,基于深度学习的点云配准研究也有很大发展。2016年,Qi等^[9]提出PointNet网络,首次实现了直接对原始点云进行深度学习,也实现了使用深度学习方法对原始点云进行配准。2019年,Wang等^[10]提出Deep Closest Point方法,结合自然语言处理的相关方法进一步提高了算法的性能。但由于深度学习方法对硬件要求高,所需的数据量较大,目前还不能适应各种应用场景的需求。

王硕等^[11]提出基于多分辨的快速迭代最近点配准算法,利用低分辨力快速迭代获取初始矩阵,利用高分辨力进行配准,从而显著缩短配准时间。胡加涛等^[12]提出基于几何特征由粗到细点云配准方法,通过投影法提取 稳健的初始矩阵,利用法向量夹角启发搜索,从而提高算法的鲁棒性。王飞鹏等^[13]提出基于高斯曲率的ICP改进 算法,利用高斯曲率剔除离群点和噪声点,从而提高算法的抗噪声和抗离群点能力。

TOF 获取的点云中背景信息占比较大,对点云配准结果的影响较大,为了解决这个问题,本文提出了一种适用于 TOF 点云数据的基于强度特征匹配的迭代最近点配准算法,利用强度信息进行点云有效位置提取,并对其进行配准,进而实现整个点云数据的配准。

1 TOF 基本原理

三维 TOF 相机通过主动发射调制光源到目标表面上,然后计算反射回来的对应光的强度变化,通过运算和 比较发射和反射光之间的相位差得到距离信息。因此,为了检测发射与反射光之间相位差,光源必须是脉冲或 者连续调制波。

脉冲调制波方法是通过光源发射一段周期性激光,然后使用2个反相的计算窗口计算传感器每个像素采样反射光能量。在采样时间内像素点按窗口开启电荷累计,每个像素点对应的距离d可表示为:

$$d = \frac{1}{2} \times c \times \Delta t \times \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} \tag{1}$$

式中: c为光速; Δt 为单位采样时间; Q_1 和 Q_2 为单位采样时间内单像素点的累计电荷量。

连续调制波方法使用4相步方法测量,每个计算窗口相位延时90°(0°,180°,90°,270°),每个像素点对应的相位 φ和距离d可表示为:

$$\varphi = \arctan\left[\frac{Q_3 - Q_4}{Q_1 - Q_2}\right] \tag{2}$$

$$d = \frac{1}{2} \times c \times \frac{\varphi}{2\pi f} \tag{3}$$

式中: f为调制频率; Q3和Q4分别为在不同相位下(90°,270°)单位采样时间内单像素点的累计电荷量。

距离景深测量的精确度受反射光强度和偏置的影响,可近似表示为:

$$\sigma = \frac{c}{4\sqrt{2}\pi f} \times \frac{\sqrt{A+B}}{C_{\rm d}A} \tag{4}$$

式中: C_d 为调制对比度,描述传感器分离和收集光电子的质量;A为反射光强度的能量;B为环境光和系统偏置。

$$A = \frac{\sqrt{(Q_1 - Q_2)^2 + (Q_3 - Q_4)^2}}{2}$$
(5)

$$B = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4}{4} \tag{6}$$

因此,提高强度A、调制频率f和调制对比度C_a,可以有效提升测量精确度。但偏置B较大,会降低测量精确度。受限于硅芯片物理特性,调制频率太高会导致调制对比度衰减,因此调制频率不能无限增大。

2 点云强度特征匹配迭代最近点配准算法

2.1 强度图预处理

非局部均值滤波(Non-Local Means Filter)是一种利用图像中冗余信息的滤波方法,在滤波的同时能最大程度保持图像的细节特征。非局部均值滤波的基本思想是当前像素的估计值由图像中与它具有相似邻域结构的像素

加权平均计算取得。本文选择使用非局部均值滤波方法对三维点云的强度图像信息进行去噪处理。 非局部均值滤波的公式为:

$$u(x) = \sum_{y \in I} w(x, y)v(y) \tag{7}$$

式中:v(y)为原始图像;u(x)为滤波后的图像;w(x,y)为权值,表示x和y的相似性:

$$w(x,y) = \frac{1}{Z(x)} \times e^{\left(-\frac{\|V(x) - V(y)\|^2}{\hbar^2}\right)}$$
(8)

式中:

$$\|V(x) - V(y)\|^{2} = \frac{1}{d^{2}} \sum_{\|z\|_{\infty} \leq d_{x}} \|v(x+z) - v(y+z)\|^{2}$$
(9)

表示以x,y为中心的矩形邻域V(x),V(y)间的距离。

$$Z(x) = \sum_{y} e^{-\left(-\frac{\|V(x) - V(y)\|^2}{\hbar^2}\right)}$$
(10)

式中: Z(x)为归一化系数; h为平滑参数, 控制高斯函数的衰减程度。

2.2 目标区域提取

目前目标区域提取的方法很多^[14],本文选择形态学方法进行目标区域提取。首先确定目标区域,通过形态 学方法确定目标区域的基本轮廓,再根据强度图与点云图的对应关系确定目标区域,实现提取。

使用形态学进行边缘提取,先对图像进行开操作,即对图像先进行腐蚀操作,然后进行膨胀操作。可由式 (11)表示:

$$\beta(AE) = AE - (AE\Theta BF) \tag{11}$$

式中: *A* 为待处理图像的点集; *B* 为结构元; β(*A*)为图像的边缘点集; *AE*Θ*BF* 为使用 *B* 结构元对 *A* 进行腐蚀处理, 在此选择 3×3 的结构元来进行处理。

对边缘点集进行膨胀处理,即可获得完整的目标区域信息,如图1所示。





(b) target area determination process

Fig.1 Effective information extraction process of depth image 图1强度图有效信息提取过程

根据强度图与点云图的对应关系,可对点云图中目标区域范围内的点进行提取。

2.3 区域迭代最近点配准

配准是通过求2组对应点云之间的变换矩阵,从而将2组点云统一到同一参考坐标系下的过程。可表示为:

$$X' = MX \tag{12}$$

式中: X和X'为变换前后的点云数据; M为变换矩阵。M矩阵可表示为:

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{T} \\ \boldsymbol{V} & \boldsymbol{S} \end{bmatrix}$$
(13)

式中: **R**为旋转矩阵; **T**为平移矩阵; **V**为透视变换向量; **S**为比例因子。因为点云的变换为刚性变换过程,所以向量**V**为零向量,比例因素*S*=0,可将式(13)化简为:

$$X' = RX + T \tag{14}$$

从2组点云数据中,分别提取2组相对应位置的点集作为源点集P和目标点集Q,则可用 $f(\mathbf{R}, \mathbf{T})$ 表示源点集 在变换矩阵(\mathbf{R}, \mathbf{T})下与目标点集Q的误差,见式(15):

$$f(\boldsymbol{R},\boldsymbol{T}) = \sum_{i=1}^{n} \left\| \boldsymbol{R} \boldsymbol{p}_{i} + \boldsymbol{T} - \boldsymbol{q}_{i} \right\|^{2}$$
(15)

式中: 源点集目标点云 $P = \{p_i | p_i \in P, i = 1, 2, 3, \dots, n\};$ 目标点集源点云 $Q = \{q_i | q_i \in Q, j = 1, 2, 3, \dots, n\}$ 。

于是,可将最优变换矩阵问题转化为求满足min{ $f(\mathbf{R}, \mathbf{T})$ }的最优解(\mathbf{R}, \mathbf{T})问题。

迭代最近点的主要方法是分别在带匹配的源点集目标点云P和目标点集源点云Q中,按照一定的约束条件, 找到最邻近点 (p_i, q_i) ,然后计算出最优匹配参数R和T,使误差函数最小。

在经典ICP算法中,误差函数可表示为:

$$E(\boldsymbol{R},\boldsymbol{T}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left\| \boldsymbol{q}_{i} - (\boldsymbol{T} + \boldsymbol{R} \times \boldsymbol{p}_{i}) \right\|^{2}$$
(16)

对于Point-to-Plane方法,误差函数可表示为:

$$\boldsymbol{M}_{\text{opt}} = \sum_{i=1}^{n} \left\| \left(\boldsymbol{M} \times \boldsymbol{p}_{i} - \boldsymbol{q}_{i} \right) \times \boldsymbol{n}_{i} \right\|^{2}$$
(17)

式中: p_i 为源点集的顶点; q_i 为目标点集的顶点; n_i 为目标点集顶点的法向量; $M \cap M_{out}$ 为目标变换矩阵。

使用2组对应的目标区域点云数据进行ICP算法配准,可得到配准后的目标区域和目标变换矩阵。利用目标 区域配准的目标变换矩阵,可对完整点云进行变换,实现完整点云配准。

3 仿真与实验分析

3.1 实验说明

本文使用 Intel I7-9700 CPU, 32 G内存电脑运行, 64 bit Windows 10 操作系统, 算法使用 Matlab 2020a 实现。 实验数据由德州仪器(TI)公司研发的 Tintin 套片 TOF 研究套件采集。Tintin 套片主要由 OPT8241 传感器芯片和 OPT9221 控制器芯片组成,其分辨力为 320×240,光学尺寸为 1/3',最高频率为 120 fps。

为了方便描述,以下将经典ICP算法简称为ICP,将正态分布变换(Normal Distributions Transform, NDT)算法^[15]简称为NDT,将本文提出的改进算法简称为本方法。由于TOF相机采集的点云数据不是一一对应关系,因此无法准确计算配准的精确度,目前主要通过均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)值来判断配准精确度。

3.2 单目标实验结果分析

使用 TOF 相机对人偶模型、牛模型、人头雕塑模型、猫模型、鱼玩偶模型和警车模型的点云数据进行采集, 调整相机位置和角度, 采集不同位姿的模型信息。

使用ICP方法、NDT方法和本方法分别对上述模型进行配准操作,并统计时间和RMSE等信息。图2~图4为部分实验数据和结果,图2~图4分别为人偶模型、人头雕塑模型和警车模型初始位置状态(左一),使用本方法(左二)、ICP方法(右二)和NDT方法(右一)与配准结果进行效果对比(其中绿色为源点云,红白色为目标点云)。 对效果进行定性分析,本方法重影最少,有效区域重复最多,效果最好;NDT方法在鱼玩偶模型和牛模型效果 较好,但猫模型效果差;ICP方法效果最差,6种模型都配准不理想。



Fig.2 Human doll model 图 2 人偶模型



Fig.4 Police car model 图4 警车模型

图 5 为 3 种方法的 RMSE 和运行时间对比图,从图中可以看出,本方法的 RMSE 最小,运行时间也少于其他 2 种方法;NDT 方法运行时间最长。



3.3 多目标实验结果分析

为进一步验证本方法的配准效果,进行多目标的配准实验。使用 TOF 相机对火车和警车模型、猫和鱼玩偶模型、人偶和飞机模型的点云数据进行采集,并使用相同的方法进行配准实验。

使用ICP方法、NDT方法和本方法分别对上述模型进行配准操作,并统计时间和RMSE等信息,实验结果如表1所示。图6和图7分别为火车和警车模型、猫和鱼玩偶模型初始位置状态(左一),使用本方法(左二)、ICP方法(右二)和NDT方法(右一)和配准结果进行效果对比(其中绿色为源点云,红白色为目标点云)。

实验结果表明,本方法效果最好,且RMSE和运行时间也优于其他方法;NDT方法效果较好,但运行时间 较长;ICP方法效果最差。

表1 双目标物体的配准结果

Table1 Registration results of double target objects								
ICP			NDT			proposed method		
points	RMSE	time/s	points	RMSE	time/s	points	RMSE	time/s
	0.021 5	0.424 8		0.035 7	2.479 5		0.010 7	0.293 0
76 800	0.020 4	0.421 6	76 800	0.033 5	1.969 8	76 800	0.008 0	0.239 5
	0.030 0	0.688 4		0.059 5	3.051 5		0.013 3	0.269 8
	points 76 800	ICP points RMSE 0.021 5 0.020 4 76 800 0.030 0	Table1 Regi ICP points RMSE time/s 0.021 5 0.424 8 0.421 6 76 800 0.020 4 0.421 6 0.030 0 0.688 4	Table1 Registration results ICP	Table1 Registration results of double targe ICP NDT points RMSE time/s points RMSE 0.021 5 0.424 8 0.035 7 0.033 5 76 800 0.020 4 0.421 6 76 800 0.033 5 0.030 0 0.688 4 0.059 5	Table1 Registration results of double target objects ICP NDT points RMSE time/s 0.021 5 0.424 8 0.035 7 2.479 5 76 800 0.020 4 0.421 6 76 800 0.033 5 1.969 8 0.030 0 0.688 4 0.059 5 3.051 5	Table1 Registration results of double target objects ICP NDT points RMSE time/s points RMSE time/s points 0.021 5 0.424 8 0.035 7 2.479 5 2.479 5 76 800 0.030 5 1.969 8 76 800 0.033 5 1.969 8 76 800 0.059 5 3.051 5 3.051 5	Table1 Registration results of double target objects ICP NDT proposed method points RMSE time/s points RMSE time/s points RMSE 0.021 5 0.424 8 0.035 7 2.479 5 0.010 7 76 800 0.020 4 0.421 6 76 800 0.033 5 1.969 8 76 800 0.008 0 0.030 0 0.688 4 0.059 5 3.051 5 0.013 3

4 结论

本文提出了一种适用于 TOF 点云数据的基于强度特征匹配的迭代最近点配准算法,利用强度信息进行点云 有效位置提取,并对其进行配准,进而实现整个点云数据的配准。实验结果表明,本文提出的方法能有效提高 点云配准的精确度,同时减少配准所需要的时间,并能获得已配准完成的有效区域数据。本文提出的利用有效 区域提取配准实现完整数据配准的方法,对单目标和多目标均有良好效果。



Fig.6 Train and police car model 图 6 火车和警车模型



Fig.7 Cat and fish doll model 图 7 猫和鱼玩偶模型

参考文献:

- [1] 侯飞,韩丰泽,李国栋,等. 基于飞行时间的三维成像研究进展和发展趋势[J]. 导航与控制, 2018,17(5):1-7,48. (HOU Fei, HAN Fengze,LI Guodong, et al. Research progress and development trend of three dimensional imaging cameras based on light flight time technique[J]. Navigation and Control, 2018,17(5):1-7,48.)
- [2] BESL P J. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2):239-256.
- [3] CHEN Y, MEDIONI G. Object modeling by registration of multiple range images[C]// Proceedings of 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Sacramento, CA, USA: IEEE, 1991.
- [4] LOW K L. Linear least-squares optimization for point-to-plane ICP surface registration[R]. Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, 2004.
- [5] SEGAL A, HHNEL D, THRUN S. Generalized-ICP[J]. Robotics: Science and Systems, 2009, 2(4):435.
- [6] NUECHTER A,LINGEMANN K,HERTZBERG J. Cached k-d tree search for ICP algorithms[C]// International Conference on 3-D Digital Imaging & Modeling. Montreal,Quebec,Canada:IEEE, 2007.
- [7] OUYANG Daoshan, FENG Hsiyung. On the normal vector estimation for point cloud data from smooth surfaces[J]. Computer-Aided Design, 2005,37(10):1071-1079.
- [8] CHETVERIKOV D, SVIRKO D, STEPANOV D, et al. The trimmed iterative closest point algorithm[C]// 2002 International Conference on Pattern Recognition. Quebec City,QC,Canada:IEEE, 2002:545-548.
- [9] QI C R, SU H, MO K, et al. PointNet: deep learning on point sets for 3D classification and segmentation[C]// 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR). Honolulu, HI, USA: IEEE, 2017:77-85.
- [10] WANG Y,SOLOMON J M. Deep closest point:learning representations for point cloud registration[C]// IEEE/CVF International Conference on Computer Vision(ICCV). Seoul,Korea(South):IEEE, 2019:3522-3531.
- [11] 王硕,王亚飞,李学华. 基于多分辨率的快速迭代最近点配准算法[J]. 计算机应用与软件, 2020,37(4):260-265,272. (WANG Shuo, WANG Yafei, LI Xuehua. Fast iterative closest point registration algorithm based on multi-resolution[J]. Computer Application and Software, 2020,37(4):260-265,272.)
- [12] 胡加涛,吴晓红,何小海,等.一种基于几何特征由粗到细点云配准算法[J]. 科学技术与工程, 2020,20(5):1947-1952. (HU Jiatao, WU Xiaohong, HE Xiaohai, et al. A coarse to fine point cloud registration algorithm based on geometric features[J]. Science, Technology and Engineering, 2020,20(5):1947-1952.)
- [13] 王飞鹏,肖俊,王颖,等.一种基于高斯曲率的ICP改进算法[J]. 中国科学院大学学报, 2019,36(5):702-708. (WANG Feipeng, XIAO Jun, WANG Ying, et al. An improved ICP algorithm using Gaussian curvature[J]. Journal of the University of Chinese Academy of Sciences, 2019,36(5):702-708.)
- [14] 陈强. 基于聚类技术的多阈值图像分割技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(4):715-718. (CHEN Qiang. Multi-threshold image segmentation based on clustering technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information

Technology, 2018, 16(4): 715-718.)

[15] BIBER P, STRASSER W. The normal distributions transform: a new approach to laser scan matching[C]// Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS 2003). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2003:2743-2748.

作者简介:

韩一菲(1996-),男,在读硕士研究生,主要研究 方向为TOF点云处理与应用.email:hanyifei@nssc.ac.cn.

刘 月(1995-), 女,在读硕士研究生,主要研究方向为光子时间飞行距离测量与成像.

郑 福(1989-),男,博士,副研究员,主要研究方向为近红外单光子探测技术.

王艳秋(1987-),女,硕士,工程师,主要研究方 向为空间科学仪器电子信息设计、信号处理.

孙志斌(1978-),男,博士,研究员,博士生导师, 主要研究方向为空间光子学、光子信息学、空间材料 学和物理电子学.

(上接第829页)

- [9] PINCHERA D, MIGLIORE M, SCHETTINO F. Compliance boundaries of 5G massive MIMO radio base stations: a statistical approach[J]. IEEE Access, 2020(8):182787-182800. doi:10.1109/ACCESS.2020.3028471.
- [10] THORS B, FURUSKÄR A, COLOMBI D, et al. Time-averaged realistic maximum power levels for the assessment of radio frequency exposure for 5G radio base stations using massive MIMO[J]. IEEE Access, 2017(5): 19711-19719. doi: 10.1109/ ACCESS.2017.2753459.
- [11] BARACCA P, WEBER A, Wild T, et al. A statistical approach for RF exposure compliance boundary assessment in massive MIMO systems[C]// Workshop on Smart Antennas(WSA) 22nd International ITG Workshop on Smart Antennas. Bochum, Germany:[s.n.], 2018:1-6.

作者简介:

罗 勇(1996-),男,硕士,主要研究方向为微波、 天线与电磁环境.email: luoyong@bupt.edu.cn.

石 丹(1981-),女,博士,教授,博士生导师, 主要研究方向为电磁兼容、超宽带无线通信、移动互 联网. **王** 冠(1985-), 女, 高级工程师, 主要研究方向 为电磁环境政策研究、环境影响评价.

刘晓勇(1979-),男,高级工程师,主要研究方向 为无线电设备检测、无线电频谱规划等.