

基于单位四元数的 ICP 改进算法

杨秋翔, 安雁艳, 杨 剑

(中北大学 计算机与控制工程学院, 山西 太原 030051)

摘 要: 针对三维点云数据配准过程中最近点搜索效率和配准精度差的问题, 提出一种基于单位四元数的 ICP 改进算法. 首先, 采用扩展方向可控的二次栅格化点云数据的策略搜索最近点对; 然后根据所得对应点对求取参考点云和待配准点云间的变换矩阵; 最后依据变换矩阵实现点云数据的配准. 实验结果表明, 所提算法在配准时间和配准精度上均有一定程度的提高, 证明该算法是有效可行的.

关键词: 点云数据; 迭代最近点; 四元数; 二次栅格化

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)03-0110-05

Improved Algorithm of Iterative Closest Point Based on the Unit Quaternion

YANG Qiu-xiang, AN Yan-yan, YANG Jian

(Department of Computer and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Concerned the problem of the closet search efficiency and registration accuracy difference in the process of three-dimensional point data registration, an improved algorithm of iterative closest point based on the unit quaternion is presented. At first, pairs of closet point are searched by using a strategy whose direction can be controlled for finding nearest neighbors of secondary rasterizing point cloud data. Then calculate the transformation matrix between reference point clouds and registration point clouds on the basis of pairs of closet point. Finally, on the basis of transformation matrix point cloud data registration is implemented. Simulated experiments showed that the provided algorithm could reduce registration time and increase registration accuracy to a certain degree which indicates that it could be more effective and feasible.

Key words: point cloud data; iterative closet point; quaternion; secondary rasterize

1 引言

随着计算机和图像获取手段的发展, 应生活和工业等方面的需求, 为了获取较为完整的物体表面信息, 图像配准技术的研究日益成熟. 迭代最近点 (ICP 算法) 算法是最为流行的配准算法. ICP 算法的关键是进行最近点的搜索, 所以如何提高搜索最近点的效率的精度是 ICP 算法的研究重点和难点. 为此许多学者一直在做深入研究, 一方面减小配准精度差可从去除错误配准点对和提取特征点这两方面着手^[1]; 另一方面可利用某种空间拓扑结构加快最近点的查找速度, 从而提高配准算法的速率^[2].

本文针对如何进一步提高三维点云数据配准过程中最近点搜索效率和减小配准精度差的问题设计了一种基于单位四元数的 ICP 改进算法, 在最近点搜索的过程中, 使用一种扩展方向可控的二次栅格化点云数据的策略提高了最近点搜索的效率, 在一定程度上提高配准速率.

2 基于单位四元数的 ICP 改进算法

经典 ICP 配准算法过程如下: 一是获取需要进行配准的参考点云数据和目标点云数据; 二是获取初始对应点集; 三是去除错误对应点对; 四是求取两个点集之间的坐标变换矩阵.

在查找对应点对集时,首先要确定一个相似性度量标准,本文使用对应点对之间的欧氏距离作为查找的根据,建立数学模型如下:

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

在迭代最近点算法中,对应点对集的求取和变换矩阵参数的求取是互为解集的,若求出其中一个问题,只需优化另一个问题即可获取最终的有效解集.在满足旋转矩阵和平移矩阵参数已知的条件下,待配准点云数据 A 和参考点云数据 B 满足以下关系:

$$d(A, B) = \min(d^2(B_i, A_j)), i \in (1, 2, 3 \dots) \\ j \in (1, 2, 3 \dots) \quad (2)$$

使得式(1)拥有最小值的点 A_i 和点 B_i 为对应点对.由式(1)、(2)可知 ICP 算法的本质上是一种基于最小二乘法的最优配准算法.或者在知道待配准的两个点云数据 A 和 B 的对应点对集时,使式(1)结果最小化的 R 和 T 即为需要求取的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T .

2.1 扩展方向可控的二次栅格化对应点对求取策略

在待配准的点云数据 A 中的任一点都可以在参考点云数据 B 中找到最近点,实际上对应点对的求取过程即是最近点的求取过程.

栅格化是指将包含所有点云数据的最小的长方体包围盒 (Box_{min}) 按某一长度划分为立方体单元格,也就是栅格^[3-4].栅格边长求取过程如下:

设点云数量为 N ,点云栅格化之后的栅格数为 Cell _{N} ,假设二者存在以下线性关系:

$$\frac{N}{\text{Cell}_N} = \alpha k \quad (3)$$

一次栅格化的栅格边长为

$$L = \sqrt[3]{\alpha} \sqrt[3]{\text{Box}_{\min} \times \frac{k}{N}} \quad (4)$$

由于 N 是已知的,根据所要求取的最近点的个数设置 k 值, α 的取值自定义设置,即可求出栅格划分的边长.

设 Dis_{average} 为所有非空栅格的平均点距,则二次栅格化的栅格边长 L' 如下:

$$L' = \frac{1}{3} \times \sqrt{k} \times \text{Dis}_{\text{average}} \quad (5)$$

以二次栅格化所得边长为依据,进行栅格化点云数据,此时最近点的搜索范围即需要进行搜索的栅格集合.以候选点与搜索范围各个面距离为搜索范围扩展方向控制的依据进行扩展直至完成最近点

的搜索.共有 720 种搜索策略^[5].

2.2 变换矩阵的求取

求解变换矩阵的方法有很多,常用的方法有:单位四元数法^[6]、对偶四元数法^[7]、奇异值分解法^[8]和正交矩阵法^[9].文献[10]中指出无论是在二维还是三维空间中,利用单位四元数法求解的变换矩阵参数均优于奇异值分解法.

旋转矩阵参数和旋转单位四元数存在的关系如下:

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

点云数据 A 和点云数据 B 的重心计算分别如下:

$$\begin{cases} \bar{A} = \frac{1}{N_A} \sum_{i=1}^{N_A} A_i \\ \bar{B} = \frac{1}{N_B} \sum_{i=1}^{N_B} B_i \end{cases} \quad (7)$$

代入式(6),可通过以下公式获取平移矩阵的 3 个方向移动参数.

$$T = \bar{B} - R\bar{A} \quad (8)$$

2.3 算法设计

本文算法的处理对象是待配准的两个点云数据:参考点云和目标点云.首先采用空间栅格法建立点云数据的拓扑关系,然后结合扩展方向可控的二次栅格化点云数据的策略进行最近点搜索确定对应点对集,若最近点之间的距离达到阈值标准,求解变换矩阵参数,完成两个点云数据间的配准,为了确保配准的精度,可以多次迭代以求得更为精确的变换矩阵参数,完成最终配准,输出配准之后的点云数据.该算法流程图如图 1 所示.

算法执行步骤如下所示.

Step1 获取需要配准的两个点云:参考点云 A 和目标点云 B ,对两个点云数据分别进行二次栅格化建立相应拓扑结构.

Step2 结合扩展方向可控的二次栅格化点云数据策略搜索算法寻找两个点云之间的对应点对集,以欧氏距离阈值和方向向量间的度量夹角为标准舍弃伪点对集.

Step3 通过对应点集求取变换矩阵的旋转参数和平移参数.

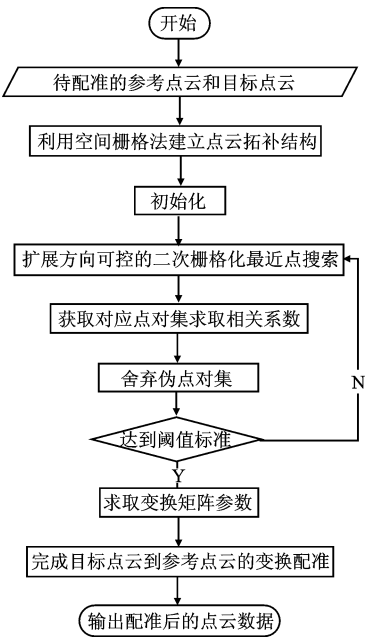


图 1 核心算法流程图

Step4 重复进行 Step2 ~ Step3, 直至前一次最近点之间的距离与后一次最近点之间的距离满足条件 $d_{后} - d_{前} \leq \varepsilon$, 其中 ε 为无穷小, 则停止迭代.

Step5 以获取的变换矩阵参数为依据将目标点云数据变换到参考点云所在的坐标系, 实现对待配准点云数据的配准.

3 算法分析

从理论上讲, 迭代的次数和每次迭代所需花费的时间是决定整个 ICP 算法效率的关键, 迭代初值的选择决定了变换矩阵参数的准确度, 也决定了最终的配准精度差.

每次迭代所需花费时间的长短决定于对应点对即最近点的查找速率. 本文算法在进行最近点的搜索时, 采用了扩展方向可控的二次栅格化点云数据搜索策略, 既结合了文献[3]在栅格化点云数据时考虑空栅格的影响而采用二次栅格化的优点, 也结合了文献[4]中搜索范围扩展时具有可控性的优点. 由于改进的 ICP 算法在搜索最近点时采用扩展方向可控的二次栅格化对应点对求取策略, 故而在多次迭代求取最近点的过程中必定会使 ICP 改进算法的运行时间有所减小. 在变换矩阵参数求取方面, 本文利用单位四元数与变换矩阵之间的关系, 增加了求取变换矩阵的准确度和方便性.

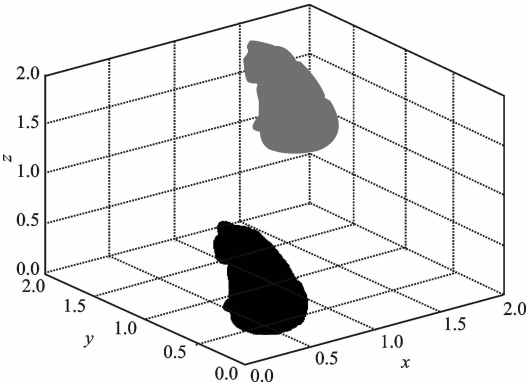
4 实验验证及结果分析

为了验证本文算法的正确性、有效性和实用性,

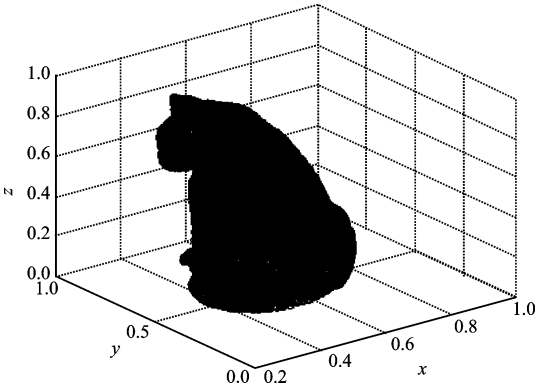
进行以下几组实验. 实验数据包括真实物体的三维点云数据和自定义的点云数据. 测试硬件环境为 Pentium4 处理器, 2.5 GHz 的 CPU, 编程环境为 matlab2012a, 测试时间为 ICP 算法的运行时间, 单位为秒.

实验 1. 以真实物体猫咪的点云数据为实验数据, 如图 2 所示. 图 2(a) 表示黑色猫咪点云数据和灰色猫咪点云数据为需要配准的两个点云数据, 图 2(b) 表示配准后点云数据. 结合扩展方向可控的二次栅格化最近点搜索策略的改进 ICP 配准算法与经典的 ICP 配准算法在不同迭代次数下的运行时间如表 1 所示.

从表 1 可以看出, 相较于经典的 ICP 算法, 在不同的迭代次数下, 改进 ICP 配准算法运行时间较小, 且呈现 10 倍左右的关系. 这表明应用扩展方向可控的二次栅格化最近邻搜索算法大大减少了 ICP 配准算法的时间, 改进的 ICP 配准算法效率确实有所提高. 从表中还可以看出, 随着迭代次数的增加, ICP 配准算法的运行时间也在增加, 这表明迭代次数是决定 ICP 配准算法运行时间的关键因素之一.



(a) 需要进行配准的两个猫咪点云数据



(b) 配准完成之后的猫咪点云数据

图 2 配准前后的猫咪点云数据

表1 使用改进的最近点搜索算法前后 ICP 配准算法完成时间对比

迭代次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
使用改进最近点搜索	6.913	8.561	10.16	12.22	14.54	16.32	18.24	20.041	22.46
未使用	0.685	0.841	1.026	1.201	1.431	1.621	1.819	1.987	2.213

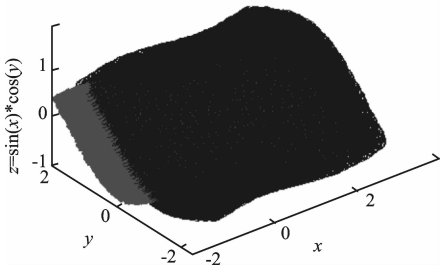
实验2. 以自定义的点云数据为实验数据,验证并分析利用三种最近点搜索(文献[3]、文献[4]和文献[5]中提出的最近点搜索算法)时 ICP 配准算法的运行时间. 所得实验结果如表2所示. 假设文献[5]中提出的最近点搜索算法为算法1,文献[3]中的最近点搜索算法为算法2,文献[4]中的最近点搜索算法为算法3. 利用算法1对自定义点云数据的配准,所得结果如图3所示. 图3(a)中的黑色和灰色点云数据分别为待配准的参考点云数据和目标点云数据,图3(b)表示配准之后的点云数据.

从图中可以看出,本文所提算法较好地实现了对不同视角下的点云数据的配准.

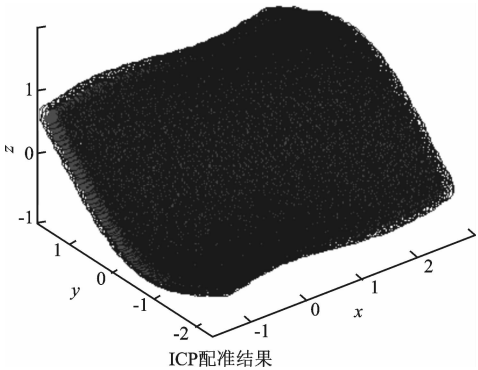
从表2可以看出,结合算法1进行 ICP 配准的时间最小,算法3次之,算法2最多,与单独进行最近点搜索所用的时间趋势大致相同. 这表明最近点搜索的快慢是 ICP 配准算法的关键.

实验3. 以具有不同点数的自定义点云数据为实验数据,验证改进的 ICP 算法和经典 ICP 算法的运行时间的大小和对应点对之间的距离均方根值 RMS 的收敛情况. 运行时间的实验结果如表3所示,对应点对之间的 RMS 如表4所示. 在点云数据量相同时不同迭代次数下的 RMS 收敛情况如图4所示. 从表1和表3可以看出,不论是对于真实物体的点云数据还是实验模拟产生的点云数据,本文提

出的改进算法均适用,所以其具有实用性. 相较于经典的 ICP 算法,本文所提算法的运行时间较少,这表明改进的 ICP 算法是具有有效性的.



(a) 配准前的待配准自定义点云数据



(b) 配准后的自定义点云数据

图3 配准前后的自定义点云数据

表2 结合3种最近点搜索算法的 ICP 配准算法完成时间对比

迭代次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
使用算法1	0.391	0.651	0.859	1.022	1.245	1.463	1.682	1.804	2.146
使用算法2	0.880	1.294	1.687	2.059	2.478	2.864	3.629	3.658	4.053
使用算法3	0.621	0.869	1.257	1.612	1.912	2.267	2.859	3.152	3.306

本文将对应点对之间的距离均方根值 RMS 作为判断配准结果的收敛性,若 RMS 收敛之后,即可证明配准结果是收敛的. 从表4可以看出,对于不同点数的点云数据,随着点云点数的增长,RMS 收敛的值越小,这表明本文算法适用于对数据量较大的点云数据进行配准,所以本文所提算法对具有不同点数的点云数据具有一般性和适应性.

从图4中可以看出,在迭代次数小于5的情况

下,两种 ICP 算法下的对应点对之间的距离均方根值 RMS 均呈线性递减的趋势;在迭代次数大于5之后,随着迭代次数的递增,二者的 RMS 均呈平稳收敛状态,且改进的 ICP 算法的 RMS 较小,表明使用该算法得到的配准结果更为精确.

5 结束语

本文以扩展方向可控的二次栅格化最近点搜索

表3 改进ICP算法和经典ICP算法对不同点数的点云数据进行配准所需时间对比 s

点云数据的点数	经典ICP算法平均运行时间	改进后的ICP算法平均运行时间
900	0.27	0.065
2 500	1.7	0.24
6 400	9.2	0.64
10 000	23	1.2
22 500	110	3.3
40 000	310	7.1
90 000	3 700	26
122 500	5 700	37

表4 改进ICP算法和经典ICP算法对不同点数的点云数据配准后的精度对比

点云数据的点数	经典ICP算法RMS	改进后的ICP算法的RMS
900	0.059 15	0.059 15
2 500	0.045 65	0.045 16
6 400	0.044 17	0.028 77
10 000	0.041 60	0.027 78
22 500	0.038 97	0.018 92
40 000	0.037 68	0.015 99
90 000	0.036 05	0.012 94
122 500	0.035 62	0.011 81

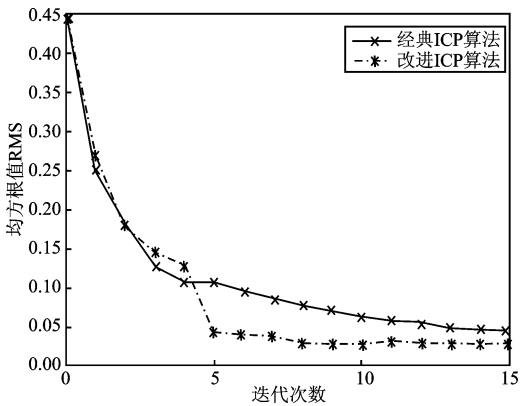


图4 经典ICP算法和改进的ICP算法的均方根值RMS对比图

策略为依据寻找对应点对,以单位四元数法为依据求解变换矩阵,提出了一种基于单位四元数的ICP改进算法.其特点在于减少了对应点对寻找所需要的时间,最终达到了减小配准时间的目的.该算法适

用于实现海量点云数据间的配准.实验结果表明迭代的次数和每次迭代所需花费的时间是决定整个ICP算法效率的关键.相较于经典的ICP算法的匹配精度和匹配速度,该算法在执行效率和配准质量上均有一定程度的提高,说明了它具有良好的性能.

参考文献:

[1] 于雅慧,况立群,韩燮,等.基于 Kinect 相机和改进 ICP 的三维物体重建 [J]. 计算机工程与设计,2014,35 (10):3574-3578.

[2] 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.

[3] 马长胜,姜晓峰,强鹤群. 散乱数据点的 k 近邻快速搜索算法 [J]. 微电子学与计算机,2007, 24(12): 206-209.

[4] 张涛,张定华,王凯,等. 空间散乱点 k 近邻搜索的新策略[J]. 机械科学与技术,2008,27(10):1233-1236.

[5] 安雁艳,杨秋翔,冯欣悦,等. 点云数据的 k 近邻快速建立改进算法[J]. 计算机工程与设计,2014,35(12): 4228-4232.

[6] 王程冬,程筱胜,崔海华,等. SIFT 算法在点云配准中的应用[J]. 传感器与微系统,2012,31(2):149-152.

[7] 杨现辉,王惠南. ICP 算法在 3D 点云配准中的应用研究[J]. 计算机仿真,2010,27(8):235-238.

[8] 王欣,张明明,于晓,等. 应用改进迭代最近点方法的点云数据配准 [J]. 光学精密工程,2012,20(9): 2068-2077.

[9] 刘丰华. 复杂模型三维点云自动配准技术的研究 [D]. 天津:天津大学,2013.

[10] 姜晓通. 离散点云数据重建关键技术的研究 [D]. 南京:南京航天航空大学,2013.

作者简介:

杨秋翔 男,(1969-),硕士,教授,硕士生导师.研究方向为信息安全、网络拓扑等.

安雁艳(通讯作者) 女,(1990-),硕士研究生.研究方向为网络信息安全、图形图像处理.

E-mail:anpang1990@163.com.

杨 剑 男,(1979-),博士,讲师.研究方向为计算机视觉、网络安全。