

基于颜色信息和几何信息的点云自适应配准算法

王勇¹, 黎春^{2*}

¹重庆理工大学两江人工智能学院, 重庆 401135;

²重庆理工大学计算机科学与工程学院, 重庆 400054

摘要 在三维点云配准中,当点云表面比较平坦、几何特征不明显时,迭代最近点算法配准效果较差,甚至经常配准失败。利用三维激光扫描仪获取的点云数据不仅包括几何坐标信息还包含 RGB 信息,充分利用点云坐标信息和 RGB 信息,提出了一种新的点云配准方法。该方法首先将 RGB 值转化成灰度值,并根据灰度值方差与各曲率方差之和设置权重因子,然后根据权重因子自适应地调整颜色信息和几何信息对配准的影响,实现了基于颜色信息和基于几何信息的有机结合。实验结果表明,该方法可实现不同点云的稳定精确配准。

关键词 图像处理; 点云配准; 多分辨率配准; 三维点云; 颜色信息; 几何信息

中图分类号 TP391 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.201015

Point Cloud Adaptive Registration Algorithm Based on Color Information and Geometric Information

Wang Yong¹, Li Chun^{2*}

¹Liangjiang College of Artificial Intelligence, Chongqing University of Technology, Chongqing 401135, China;

²School of Computer Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

Abstract In the three-dimensional point cloud registration, when the surface of the point cloud is relatively flat and the geometric features are fuzzy, the iterative closest point algorithm has poor registration results, even often fails to register. The point cloud data obtained by the three-dimensional laser scanner includes geometric coordinate information and RGB information. Here, by making full use of point cloud coordinate information and RGB information, we propose a new point cloud registration method, which first convert RGB values into grayscale values, set the weighting factor according to the sum of the variance of the gray value and the sum of the variances of each curvature, and then adaptively adjust the impact of color information and geometric information on registration in the light of the weighting factor to achieve an organic combination based on color information and geometric information. Experimental results show that the proposed method can achieve stable and accurate registration of different point clouds.

Key words image processing; point cloud registration; multi-resolution registration; three-dimensional point cloud; color information; geometric information

OCIS codes 100.6890; 100.3010; 100.2000

1 引言

近年来,激光扫描仪的捕获速度得到进一步提高且能够有效捕获物体表面的细节特征,因此在对对象进行建模时的精度更高、效果更好。但由于测

量环境和仪器本身的限制,无法一次性获取完整的物体点云数据,需要在多个视角下多次扫描得到物体各个面的点云数据,并对其进行拼接最终得到完整的物体模型。

在众多点云配准技术中,最流行的就是迭代最

收稿日期: 2019-12-10; 修回日期: 2020-01-15; 录用日期: 2020-03-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61502065)、重庆市科学技术委员会基础与前沿研究重点项目(cstc2015jcyjBX0127)、重庆市巴南区技术合作项目([2016]33)、重庆理工大学研究生创新基金项目(ycx2018243)

* E-mail: 2351583604@qq.com

近点(ICP)算法^[1],该算法相对简单且配准精度较高,但该算法是对所有数据点进行操作的,其算法速度较慢。为了解决这个问题,国内外学者针对不同点云数据及不同的应用场景提出了各种改进算法。文献[2-5]都是在传统 ICP 算法基础上进行改进的三维(3D)ICP 算法,这些算法相对于传统 ICP 算法在精度和速度方面都有所提升,但当物体模型几何特征单一时,配准效果较差甚至容易导致配准失败。为了解决这个问题,国内外学者提出了四维(4D)ICP 算法,如 Men 等^[6]提出了一种基于颜色点云配准的 4D-ICP 算法,该方法将加权色调值与 3D 坐标数据一起进行配准,提高了查找对应点的准确性,同时在最近点搜索时引入 k 维树(KD tree),提高了配准的速度,但该方法相对于传统 ICP 算法在精度上并没有多大的提高。如苏本跃等^[7]提出一种面向 RGB-D 数据的 4D-ICP 配准算法,该方法与文献[6]算法都是结合颜色值与 3D 坐标值混合完成点云配准,但该方法配准的精度高于文献[6],但其速度有待提升。如 Park 等^[8]提出了一种联合光度和几何信息的算法用于两个彩色点云配准,该方法为了定义用于点云配准的光度目标,在每个点的切平面引入虚拟图像,通过这种方式,可以有效完成彩色点云配准,但由于引入的虚拟图像是对隐式颜色变化的局部近似,其配准精度不高。如 Lohani 等^[9]提出了一种强度增强 ICP(IAICP)算法,该方法利用与坐标一起获取的辐射测量数据,并结合几何坐标实现粗配准。对于一般的三维点云数据,该方法精度比较高,速度也较快,但对较平坦的点云数据,其配准速度很慢。

为了有效实现物体表面比较平坦、几何特征不明显的点云的配准,本文充分利用点云颜色信息和几何信息,提出了一种基于颜色信息和几何信息的点云自适应配准算法。为了弱化光照的影响,采用加权平均法将三通道的 RGB 转换为单通道的灰度值(即强度值或亮度值)。然后分别对曲率数据和灰度值数据进行归一化,并计算归一化后灰度值的方差与归一化后各曲率方差之和,以确定自适应匹配度中的权重因子。为了保证点云配准的精度,提出一种结合灰度值数据和曲率信息的自适应匹配度获取对应点。为了保证点云配准的速度,在点云最近邻搜索时引入 KD tree 结构,同时采用文献[10]中的多分辨率 ICP 框架在保证精度的同时进一步提高点云配准的速度。本文方法经实验验证有效地提高了点云配准的精度和速度,算法鲁棒性也比较好。

2 算法总体描述

本文基于颜色信息和几何信息并结合多分辨率框架^[10-11]实现点云的精确配准。该方法首先将点云的 RGB 颜色特征转换成灰度值,并将其作为点云信息的第四维。其次计算目标点云的曲率信息,分别对曲率信息和灰度值数据进行归一化处理,计算目标点云中灰度值的方差和曲率信息的方差之和,并计算权重因子。再对源点云和目标点云建立 KD tree,并计算源点云中所有点的法向量夹角平均值,根据夹角平均值分级并设置最大分辨率,根据采样比例进行下采样。然后根据提出的结合灰度值数据和曲率信息的自适应匹配度求采样点的精确匹配点。最后针对精确的匹配点对使用四元数法获取旋转矩阵和平移向量完成拼接。

本文算法的基本流程如图 1 所示,其算法步骤如下:

1) 分别将源点云 P 中的每一点 $p_i(x_i, y_i, z_i, r_i, g_i, b_i)$ 和目标点云 Q 中的每一点 $q_j(x_j, y_j, z_j, r_j, g_j, b_j)$ 中的 RGB 颜色值转换成灰度值,得到 $p_i(x_i, y_i, z_i, g_i^1)$ 和 $q_j(x_j, y_j, z_j, g_j^1)$ 。

2) 采用最大最小规范化方法分别对 P 和 Q 中的灰度值进行归一化处理。

3) 分别对 P 和 Q 构建 KD tree,并采用主成分分析(PCA)法分别求 P 中每个点 p_i 的法向量 p_n 和 Q 中每个点 q_j 的法向量 q_n 。

4) 求 P 中每个点 p_i 的法向量夹角平均值 M_i ,根据 M_i 分为 S 级并计算最大分辨率 N 。

5) 计算 Q 中每个点 q_j 的主曲率 q_{j1}, q_{j2} ,高斯曲率 q_{j3} 和平均曲率 q_{j4} ,并归一化。

6) 计算 Q 中每个点 q_j 的灰度值的方差以及主曲率 q_{j1}, q_{j2} ,高斯曲率 q_{j3} ,平均曲率 q_{j4} 的方差之和,并计算权重因子。

7) 计算采样比例 $R_{i,j}$,并根据采样比例采样。

8) 求 P 中每个采样点 p_i 的主曲率 p_{i1}, p_{i2} ,高斯曲率 p_{i3} 和平均曲率 p_{i4} ,并归一化。

9) 计算 p_i 与其在 Q 中 k 近邻点 q_i^k 的匹配度 $M(p_i, q_i^k)$,将匹配度 $M(p_i, q_i^k)$ 值最小的点作为 p_i 的匹配点。

10) 根据步骤 9) 获得的精确匹配点对使用四元数法获取旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{T} 。

11) 根据 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 对 P 进行变换,得到转换后的点云集 P_1 。

12) 重复步骤 9)~11) 直到目标函数 $F(\mathbf{R}, \mathbf{T}) =$

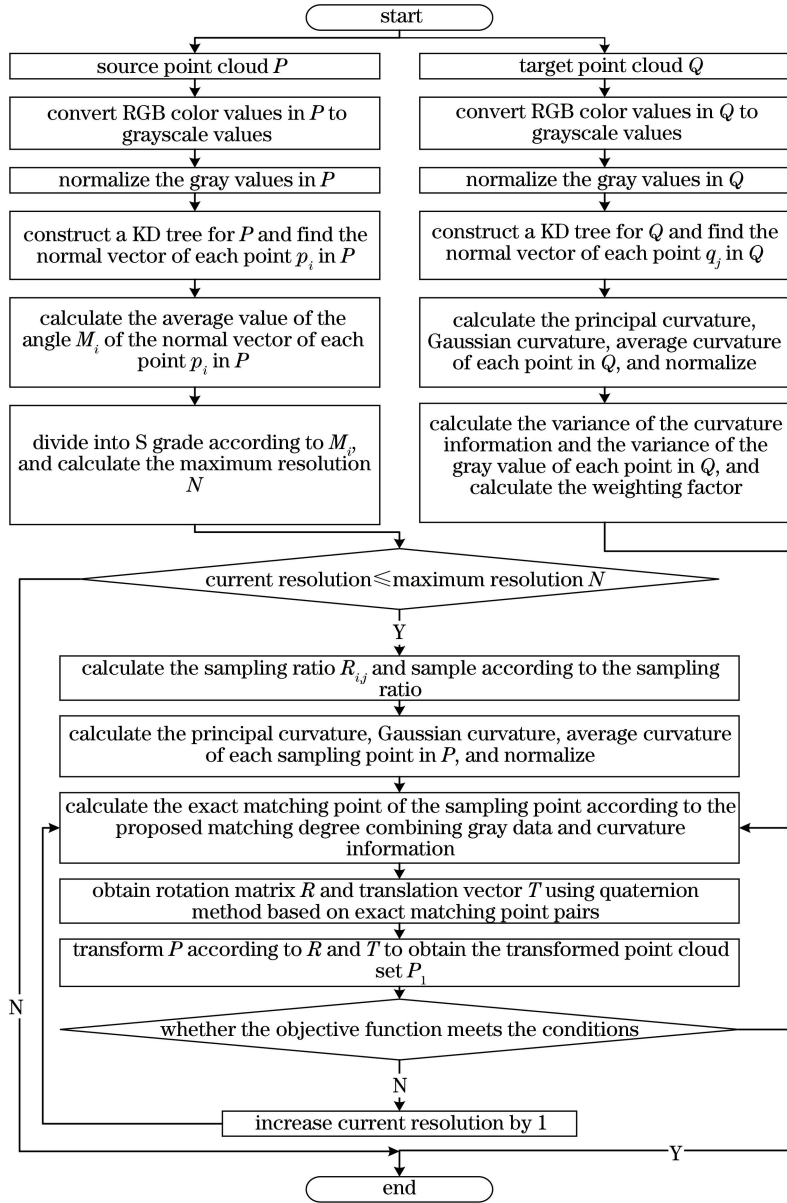


图1 算法基本流程

Fig. 1 Basic flow of algorithm

$\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \|q'_i - (Rp'_i + T)\|_2$ 满足条件, 式中 n 为匹配点对总数, p'_i 为源点集中的采样点, q'_i 为 p'_i 对应的目标点集中的点。

13) 若分辨率不为 N , 则进入下一分辨率, 返回步骤 7)。

3 算法详细描述

3.1 数据处理

三维扫描仪获取的点云信息不仅包含深度信息, 还包含颜色纹理等信息。本文采用拍照式彩色扫描仪 ADAM-S02S 获取点云数据, 这些点云数据

中包含了大量信息, 而本文需要的几何坐标信息和颜色信息就隐藏在这些点云数据中, 需要采用数据处理将其从点云中提取出来, 并将点云数据转换为 (x, y, z, r, g, b) 形式, 其中 (x, y, z) 表示点云的三维坐标, (r, g, b) 表示点云的颜色信息。

为了减少光照对配准结果的干扰, 同时为了减少三维点云的信息量以及后续的运算量, 都需要将 RGB 颜色数据灰度化。这样可以更有效地结合颜色信息完成配准, 同时能够提高后续算法的处理速度, 提高配准效率。本文采用加权平均法^[12]将 R 、 G 、 B 三个分量分别赋以不同的权值进行灰度转换, 其计算公式为

$$\begin{cases} G_r(i, j, k) = aR(i, j, k) + bG(i, j, k) + cB(i, j, k) \\ a + b + c = 1 \end{cases}, \quad (1)$$

式中:各分量的权值根据人眼对各分量敏感度的不同分别为 $a=0.30, b=0.59, c=0.11$; R 表示 (i, j, k) 坐标点对应的红色分量; G 表示 (i, j, k) 坐标点对应的绿色分量; B 表示 (i, j, k) 坐标点对应的蓝色分量; G_r 表示 (i, j, k) 坐标点对应的 RGB 信息转换后的灰度值。本文通过(1)式将点云中每个点对应的 RGB 颜色信息转换成灰度值并将其作为点云数据的第四维,即将 (x, y, z, r, g, b) 格式的数据转换成 (x, y, z, g^1) 格式进行后续处理。

为了减少曲率数据和灰度值数据范围不一致对配准带来的不利影响,在进行配准前首先对数据进行归一化处理。本文采用最大最小规范化方法分别处理曲率信息(主曲率、高斯曲率、平均曲率)和灰度值数据。

3.2 关键点采样

采用文献[10]中的采样方法进行采样,当分辨率为 $1 \leq j \leq N$, 级数为 $1 \leq i \leq S$ 时,采样比例计算公式为

$$R_{i,j} = \frac{\exp(-S+i)}{1 + \exp[\text{fix}(N/2) - j]}, \quad (2)$$

式中: S 为最大级数; N 为最大分辨率。

3.3 匹配点对获取

匹配点对的获取是 ICP 算法中比较关键的一步,选取匹配对的精确与否将直接影响最终配准的精度,因此,匹配策略的选取十分重要。传统 ICP 算法采取最近邻搜索,对于源点云中的每个点计算与目标点云中若干个近邻点的欧氏距离,并选择欧氏距离最小的点作为对应点。该方法计算量较大,同时也存在大量误匹配点对。

针对传统 ICP 匹配耗时的问题,本文算法中引入 KD tree 结构,在一定程度上加速了算法的搜索速度,同时在整个算法中引入多分辨率框架,进一步加快了配准速度。针对传统 ICP 匹配策略存在大量误匹配的情况,提出了一种结合灰度值数据和曲率信息的自适应匹配度来选择匹配点,以提高匹配点对的准确性。其匹配度公式为

$$M(p_i, q_i^k) = f_c \left[\sum_{m=1}^4 (p_{im} - q_{im}^k)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + f_g [(g_i - g_i^k)^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

式中: p_i 是源点云中任意的一个采样点; q_i^k 是 p_i 在目标点集中的 k 近邻点; p_{im} ($m=1, 2, 3, 4$) 分别是

p_i 的主曲率 p_{i1}, p_{i2} , 高斯曲率 p_{i3} , 平均曲率 p_{i4} ; q_{im}^k ($m=1, 2, 3, 4$) 分别是 q_i^k 的主曲率 q_{i1}^k, q_{i2}^k , 高斯曲率 q_{i3}^k , 平均曲率 q_{i4}^k ; g_i 表示 p_i 的颜色分量; g_i^k 表示 p_i 在目标点集中的 k 近邻点 q_i^k 的颜色分量; f_c 表示几何特征的权重因子; f_g 表示颜色特征的权重因子。

在(3)式中引入权重因子主要是为了自适应地处理几何信息和颜色信息不同的点云数据。当点云数据的几何特征比较丰富时, f_c 的权重会相应增大,当点云数据的颜色信息比较丰富时, f_g 的权重会相应增大。

本文提出根据几何曲率的方差之和以及颜色值的方差来衡量权重因子的权值。数据的方差越大,说明数据的波动就越大,若曲率方差和大于颜色值方差,则说明曲率信息波动更明显,其几何特征更丰富。若颜色值方差大于曲率方差和,则说明颜色值波动更明显,其颜色信息更丰富。权重因子 f_c 和 f_g 的计算公式为

$$\begin{cases} f_c = V_c / (V_c + V_g) \\ f_g = 1 - f_c \end{cases}, \quad (4)$$

式中: V_g 是灰度值的方差; V_c 是曲率的方差和,即 $V_c = V_{p_{i1}} + V_{p_{i2}} + V_{p_{i3}} + V_{p_{i4}}$; $V_{p_{i1}}, V_{p_{i2}}, V_{p_{i3}}, V_{p_{i4}}$ 分别是点云中某点 p_i 的主曲率 p_{i1}, p_{i2} , 高斯曲率 p_{i3} , 平均曲率 p_{i4} 的方差。

4 实验结果与分析

本文实验数据均通过实验室搭建的拍照式彩色扫描仪 ADAM-S02S 获取。实验在 Intel(R) Core (TM) i5-6300HQ CPU、8 GB 内存、Windows10 操作系统、Matlab 2015a 环境下进行。算法参数 $k=8$ 。

为了验证算法对颜色特征变化比较明显但几何特征变化不明显的点云数据进行配准的有效性,对扫描的脸谱(Facial Makeup)数据进行了配准实验。为了验证算法对颜色特征变化和几何特征变化都不明显的点云数据进行配准的有效性,对扫描的水壶(Kettle)数据进行了配准实验。为了验证算法对几何特征变化比较明显但颜色单一的点云数据进行配准的有效性,对扫描的石膏像(Plaster Statue)进行了配准实验。并将本文算法分别与经典 ICP、4D-ICP(Hue)、4D-ICP(IAICP)进行了对比分析,其配

准结果分别如图 2~4 所示。其中(a1)、(a2)分别是未加入噪声时和加入高斯噪声后两片点云的初始位姿；(b1)、(c1)、(d1)、(e1)分别是未加入噪声时经典 ICP 算法、4D-ICP(Hue)算法、4D-ICP(IAICP)算法

和本文算法配准的效果图；(b2)、(c2)、(d2)、(e2)分别是加入高斯噪声后经经典 ICP 算法、4D-ICP(Hue)算法、4D-ICP(IAICP)算法和本文算法配准的效果图。

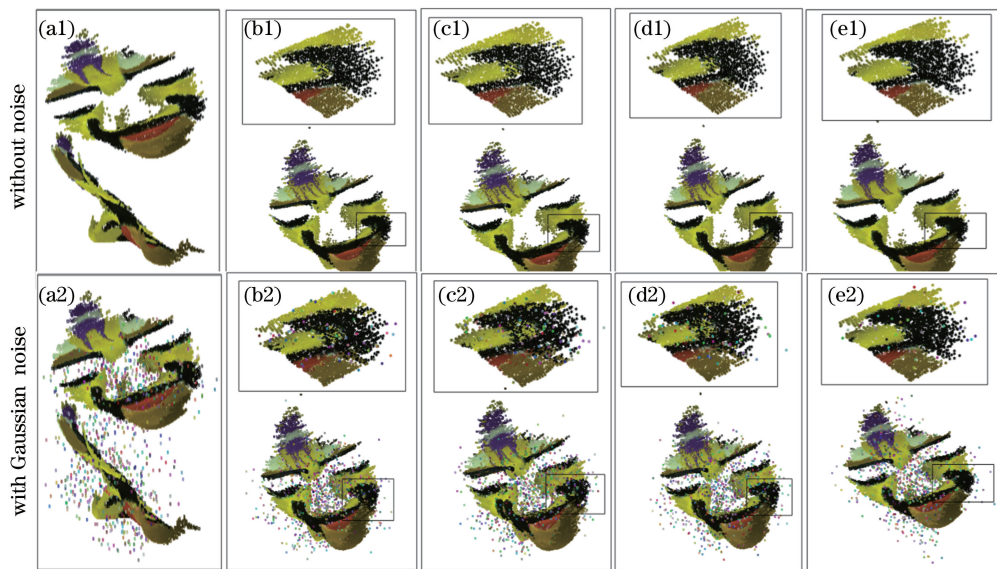


图 2 脸谱点云配准结果。(a1)两片点云的初始位姿；(b1)两片点云在经典 ICP 算法、(c1) 4D-ICP(Hue)算法、(d1) 4D-ICP(IAICP)算法、(e1)本文算法下的配准效果图；(a2)两片点云的初始位姿；(b2)两片点云在经典 ICP 算法、(c2) 4D-ICP(Hue)算法、(d2) 4D-ICP(IAICP)算法、(e2)本文算法下的配准效果图

Fig. 2 Facial Makeup point cloud registration results. (a1) Initial pose of two point clouds; registration results of (b1) two point clouds under the classical ICP algorithm, (c1) 4D-ICP(Hue) algorithm, (d1) 4D-ICP(IAICP) algorithm, and (e1) proposed algorithm; (a2) initial pose of two point clouds; registration results of (b2) two point clouds under the classical ICP algorithm, (c2) 4D-ICP(Hue) algorithm, (d2) 4D-ICP(IAICP) algorithm, and (e2) proposed algorithm

在图 2~4 中,图 2(a1)、图 3(a1)和图 4(a1)分别是两次从不同角度扫描的 Facial Makeup、Kettle 和 Plaster Statue 的点云数据,这些数据在扫描时通过将目标物旋转一定角度获取,由于旋转角度任意,所以存在一部分重叠数据。为了更好地观察几种算法的配准效果,对图 2 和图 3 配准结果图中的边缘进行了细节放大处理。图 4(a1)和(a2)为 Plaster Statue 数据的二维显示,为了便于观察配准的效果,图 4(b1)~(e1)和(b2)~(e2)中的配准结果图均为转换了一定角度的三维显示。

在图 2 中,未加入噪声时,各算法均成功对该数据进行了配准,仔细观察上方的细节放大图,可以看出,传统 ICP、4D-ICP(Hue)和 4D-ICP(IAICP)配准精度相差不大,但脸谱嘴角上方区域黑色部分和黄色部分有一小部分重叠,说明配准有一定的错位,而本文算法很好地进行了配准,且嘴角上方区域也基本不存在错位。在加入高斯噪声后,从配准结果中

的细节放大图可以看出,4D-ICP(Hue)受噪声影响最大,脸谱嘴角上方区域效果最差,传统 ICP 和 4D-ICP(IAICP)的效果差不多。对比图 2(e1)和图 2(e2)可以看出,本文算法也受到了噪声的影响,但对比其他三种算法,本文算法受噪声干扰影响最小,其配准效果在几种算法中最好。在图 3 中,未加入噪声时,各算法配准效果差异较大,可以很明显看出算法的优劣,传统 ICP 与 4D-ICP(Hue)配准效果差不多,4D-ICP(IAICP)比前两者配准效果更好,但从细节放大图可以看出,其他三种算法边缘重叠部分的配准效果并不好,而本文算法在边缘部分也很好地完成了配准。在加入噪声后,与图 3 中未加入噪声时的配准效果相比,可以明显看出,4D-ICP(Hue)算法受噪声影响很大,在加入噪声后配准效果明显变差,但本文算法受噪声的影响较小。在图 4 中,本文算法较传统 ICP、4D-ICP(Hue)和 4D-ICP(IAICP)算法配准效果略好,这是因为本文算法在寻找匹配

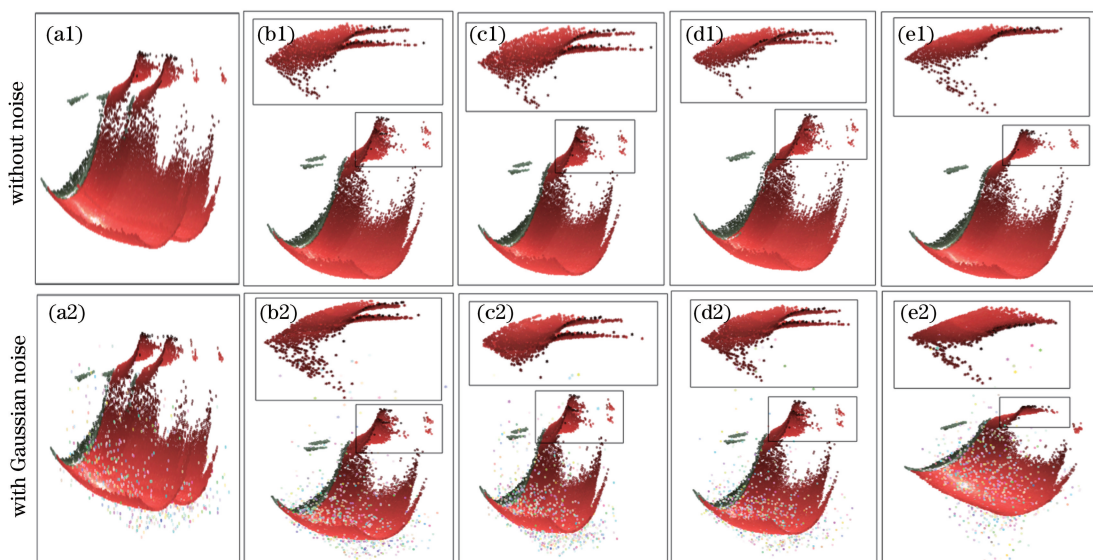


图 3 水壶点云配准结果。(a1)两片点云的初始位姿;(b1)两片点云在经典 ICP 算法、(c1) 4D-ICP(Hue)算法、(d1) 4D-ICP (IAICP)算法、(e1)本文算法下的配准效果图;(a2)两片点云的初始位姿;(b2)两片点云在经典 ICP 算法、(c2) 4D-ICP(Hue)算法、(d2) 4D-ICP (IAICP)算法、(e2)本文算法下的配准效果图

Fig. 3 Kettle point cloud registration results. (a1) Initial pose of two point clouds; registration results of (b1) two point clouds under the classical ICP algorithm, (c1) 4D-ICP (Hue) algorithm, (d1) 4D-ICP (IAICP) algorithm, and (e1) proposed algorithm; (a2) initial pose of two point clouds; registration results of (b2) two point clouds under the classical ICP algorithm, (c2) 4D-ICP (Hue) algorithm, (d2) 4D-ICP (IAICP) algorithm, and (e2) proposed algorithm

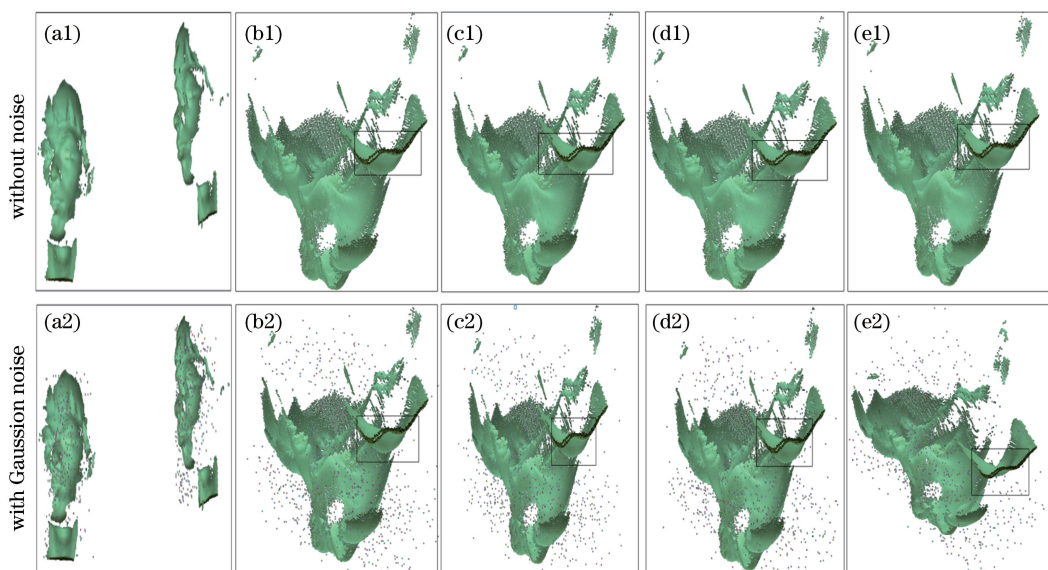


图 4 石膏像点云配准结果。(a1)两片点云的初始位姿;(b1)两片点云在经典 ICP 算法、(c1) 4D-ICP(Hue)算法、(d1) 4D-ICP (IAICP)算法、(e1)本文算法下的配准效果图;(a2)两片点云的初始位姿;(b2)两片点云在经典 ICP 算法、(c2) 4D-ICP(Hue)算法、(d2) 4D-ICP (IAICP)算法、(e2)本文算法下的配准效果图

Fig. 4 Plaster statue point cloud registration results. (a1) Initial pose of two point clouds; registration results of (b1) two point clouds under the classical ICP algorithm, (c1) 4D-ICP (Hue) algorithm, (d1) 4D-ICP (IAICP) algorithm, and (e1) proposed algorithm; (a2) initial pose of two point clouds; registration results of (b2) two point clouds under the classical ICP algorithm, (c2) 4D-ICP (Hue) algorithm, (d2) 4D-ICP (IAICP) algorithm, and (e2) proposed algorithm

表1 未加入噪声时四种算法的配准结果对比

Table 1 Comparison of registration results of four algorithms without noise

Algorithm	Facial Makeup		Kettle		Plaster Statue	
	Time /s	RMSE	Time /s	RMSE	Time /s	RMSE
Classic ICP	41.9503	0.7593	161.0838	1.0308	403.9433	1.7777
4DICP(Hue)	6.9744	0.7593	24.5846	1.0308	48.8892	1.7777
4DICP(IAICP)	7.4606	0.7343	25.0561	1.0165	52.5325	1.7712
Proposed	3.6731	0.6285	7.2946	0.5526	11.5577	1.7538

表2 加入高斯噪声后四种算法的配准结果对比

Table 2 Comparison of registration results of four algorithms with Gaussian noise

Algorithm	Facial Makeup		Kettle		Plaster Statue	
	Time /s	RMSE	Time /s	RMSE	Time /s	RMSE
Classic ICP	39.3951	0.9698	158.2914	1.0584	454.7796	1.8817
4DICP(Hue)	8.2593	1.2183	34.6578	1.1007	59.0262	1.8265
4DICP(IAICP)	7.8049	0.9316	28.1950	1.0582	56.9596	1.8811
Proposed	4.1339	0.6293	8.3330	0.5521	12.0035	1.7543

点时,其几何特征比 4D-ICP (Hue) 和 4D-ICP (IAICP)的几何特征更强壮。但各算法在该数据下的配准效果差异不大,这是因为 Plaster Statue 数据几何特征比较丰富但颜色特征单一,所以 4D-ICP (Hue)、4D-ICP(IAICP)和本文算法的颜色分量在该数据中并不能体现出其优越性。在加入噪声后,各配准算法配准效果也没有受到较大的影响,这是因为该数据几何特征比较明显,在加入少量噪声时的干扰性也比较小。

为了更准确分析各算法的配准效果,表1是未加入噪声时四种算法配准的时间和误差统计。可以看出,经典 ICP、4D-ICP(Hue)和 4D-ICP (IAICP)这三种算法精度差不多,但是 4D-ICP(Hue)和 4D-ICP (IAICP)算法速度较快。精度差不多是因为这三种算法都是基于坐标点的欧氏距离来寻找对应点的,但 4D-ICP(Hue)和 4D-ICP (IAICP)在经典 ICP 基础上多了一维颜色信息,使其算法精度比经典 ICP 略高,同时结合颜色信息寻找对应点也加速了

算法收敛,从而使整体配准的速度得到了提升。从表1中可以看出,本文算法不管是在哪种数据下,无论是精度还是速度,相比经典 ICP、4D-ICP(Hue)、4D-ICP (IAICP)都有大幅度提高。在精度上的提升是因为本文算法采用具备缩放、旋转及平移不变性的曲率特征和颜色特征来寻找对应点,使得误匹配点对更少。在速度上的提升,一方面是因为本文算法采用 KD-tree 加快了近邻点的搜索,另一方面是因为本文算法采用多分辨率配准的思想,利用低分辨率匹配点对快速配准,再利用高分辨率匹配点对提高配准精度,从而既保证了配准的精度,又提高了配准的速度。

表2是加入高斯噪声后四种算法配准的时间和误差统计。可以看出,几种算法均不同程度地受到噪声的影响,其中,经典 ICP、4D-ICP(Hue)和 4D-ICP (IAICP)这三种算法受噪声影响比较大,而本文算法受噪声影响较小,在噪声比较小的情况下基本可以忽略。

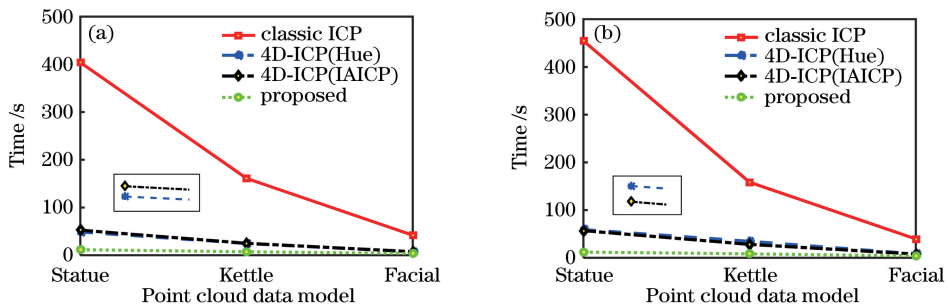


图5 配准结果时间对比折线图。(a)未加入噪声时各方法在不同模型上的时间;(b)加入高斯噪声后各方法在不同模型上的时间

Fig. 5 Time comparison line chart of registration results. (a) Time of each method on different models without noise;

(b) time of each method on different models with Gaussian noise

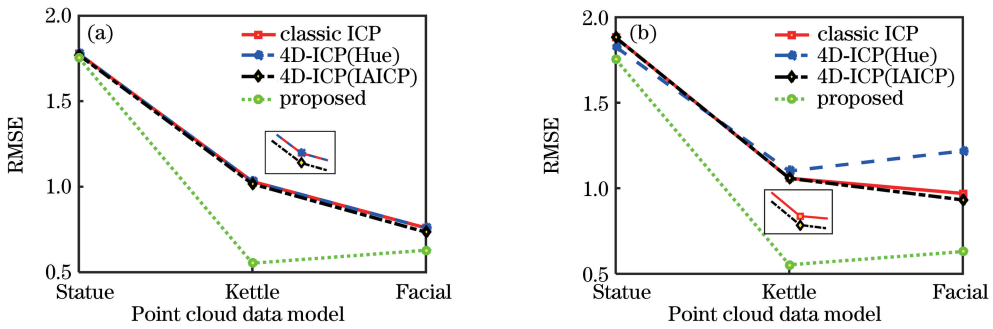


图6 配准结果误差对比折线图。(a)未加入噪声时各方法在不同模型上的误差;(b)加入高斯噪声后各方法在不同模型上的误差

Fig. 6 Error comparison line chart of registration results. (a) Error of each method on different models without noise;

(b) error of each method on different models with Gaussian noise

为了更直观地对比各算法的配准效果,图5和图6的折线图分别对加入噪声前后各算法配准的时间和误差进行了对比。图5(a)是未加入噪声时各算法在各数据上的时间对比,图5(b)是加入高斯噪声后各算法在各数据上的时间对比。图6(a)是未加入噪声时各算法在各数据上的误差对比,图6(b)是加入高斯噪声后各算法在各数据上的误差对比。从图中可以直观地看出,本文算法相对于经典ICP、4D-ICP(Hue)、4D-ICP(IAICP)算法更具有优越性。

5 结 论

本文提出了一种基于颜色信息和几何信息的点云自适应配准算法。该方法首先将RGB值转化成灰度值,并根据灰度值方差、曲率方差和大小设置权重因子的大小,然后根据权重因子自适应的调整颜色信息和几何信息对配准的影响,实现基于颜色信息和基于几何信息的有机结合。在该算法中,为了进一步提高配准的精度,提出了一种结合灰度值数据和曲率信息的自适应匹配度公式精确获取对应点。为了提高算法配准的速度,引入KD tree加速近邻点的搜索,同时引入多分辨率框架加速配准。

本文算法通过实验证明,在精度和速度方面都有极大提升,且算法性能比较稳定,但本文算法仍然存在一些不足之处,对于尺度不一致的点云配准问题,算法并不能有效配准,这也是在将来的研究中需要进一步完善的方向。

参 考 文 献

- [1] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2):239-256.
- [2] Li W M, Song P F. A modified ICP algorithm based on dynamic adjustment factor for registration of point cloud and CAD model [J]. Pattern Recognition Letters, 2015, 65:88-94.
- [3] Sun J H, Zhang J, Zhang G J. An automatic 3D point cloud registration method based on regional curvature maps [J]. Image and Vision Computing, 2016, 56:49-58.
- [4] Chen X, He B W. A fast global registration algorithm based on correcting point cloud principal component coordinate system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061003. 陈旭, 何炳蔚. 一种基于校正点云主成分坐标系的快速全局配准算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061003.
- [5] Liu J, Bai D. 3D point cloud registration algorithm based on feature matching [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12):1215005. 刘剑, 白迪. 基于特征匹配的三维点云配准算法 [J]. 光学学报, 2018, 38(12):1215005.
- [6] Men H, Gebre B, Pochiraju K. Color point cloud registration with 4D ICP algorithm [C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 9-13 May 2011, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2011:1511-1516.
- [7] Su B Y, Han W, Peng Y S, et al. 4D-ICP point cloud registration method for RGB-D data [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2018(4):829-837. 苏本跃, 韩韦, 彭玉升, 等. 面向RGB-D数据的4D-ICP点云配准方法 [J]. 南京大学学报(自然科学版), 2018(4):829-837.
- [8] Park J, Zhou Q Y, Koltun V. Colored point cloud registration revisited [C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 22-29 Oct. 2017, Venice, Italy. New York: IEEE Press, 2017:

- 143-152.
- [9] Lohani B, Sasidharan S. An evaluation of intensity augmented ICP for terrestrial LiDAR data registration[J]. Journal of Geomatics, 2017, 11(2): 119-148.
- [10] Wang Y, Li C, He Y M, et al. Improved multi-resolution point cloud automatic registration algorithm[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019, 40(10):2236-2240.
王勇, 黎春, 何养明, 等. 改进的多分辨率点云自动配准算法[J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40(10): 2236-2240.
- [11] Jost T, Hugli H. A multi-resolution ICP with heuristic closest point search for fast and robust 3D registration of range images [C]//Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. 6-10 Oct. 2003, Banff, Alta., Canada. New York: IEEE Press, 2003:427-433.
- [12] Zhu H, et al. Digital image processing[M]. Beijing: Science Press, 2005.
朱虹, 等. 数字图像处理基础[M]. 北京: 科学出版社, 2005.