



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107749079 B

(45)授权公告日 2020.03.17

(21)申请号 201710872963.4

(22)申请日 2017.09.25

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 107749079 A

(43)申请公布日 2018.03.02

(73)专利权人 北京航空航天大学

地址 100191 北京市海淀区学院路37号

(72)发明人 周忠 吴威 余亦豪 闫飞虎

(74)专利代理机构 北京科迪生专利代理有限公司 11251

代理人 安丽

(51)Int.Cl.

G06T 17/00(2006.01)

G01C 21/20(2006.01)

(56)对比文件

CN 104504709 A,2015.04.08,

US 2012078585 A1,2012.03.29,

CN 102662179 A,2012.09.12,

CN 101581874 A,2009.11.18,

闫飞虎.特征自适应的三维点云模型简化.《中国优秀硕士学位论文全文数据库(信息科技辑)》.2013,

黄建军.无人机自主飞行轨迹规划与重规划方法研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库(工程科技II辑)》.2014,

审查员 王利双

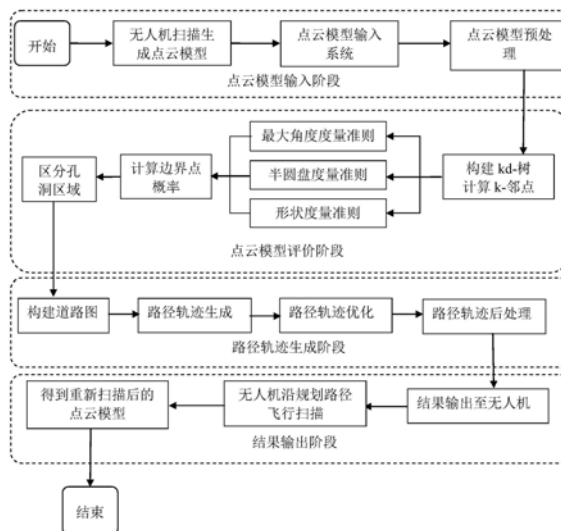
权利要求书3页 说明书10页 附图3页

(54)发明名称

一种面向无人机扫描重建的点云质量评价和轨迹规划方法

(57)摘要

本发明公开了一种面向无人机扫描重建的点云质量评价和无人机轨迹规划方法,步骤:使用无人机扫描来获取并重建出场景原始的点云模型;使用kd树将点云模型的点进行分类;对点云中的每个点,分别估算该点是孔洞边界点的概率,将三个概率加权平均,综合判断该点是否为孔洞边界点;采用搜索最近点的方法生成孔洞边界线,区分不同的孔洞;在点云模型场景中使用球填充方法构造带有可见性信息的道路图;生成最佳无人机重扫描轨迹;最后输出结果,将生成的路径反馈给无人机,无人机沿规划路径飞行,将点云模型孔洞区域修补完整。本发明协助无人机快速自动地重新扫描要重建的场景,生成更为精确的建筑模型,减少建筑点云模型中缺失纹理的孔洞区域。



1. 一种面向无人机扫描重建的点云质量评价和无人机轨迹规划方法,其特征在于:分为点云模型的获取、点云模型的评价、路径轨迹生成和结果输出四个步骤;其中:

点云模型的获取的步骤如下:

第一步,使用无人机扫描来获取并重建出场景原始的点云模型;

第二步,对获得的点云模型进行预处理,包括光顺去噪、坐标系转化和模型配准;

点云模型的评价的步骤如下:

第三步,使用kd树将点云模型的点进行分类,得到点云中每个点的k邻点;

第四步,对点云中的每个点,使用最大角度度量准则、半圆盘度量准则、形状度量准则,分别估算该点是孔洞边界点的概率,将三个概率加权平均,综合判断该点是否为孔洞边界点;

第五步,采用搜索最近点的方法生成孔洞边界线,区分不同的孔洞,得到封闭孔洞区域;

路径轨迹生成的步骤如下:

第六步,基于封闭孔洞区域集合,在点云模型场景中使用球填充方法构造带有可见性信息的道路图;

第七步,基于带有可见性信息的道路图生成最佳无人机重扫描轨迹;

第八步,对生成的无人机路径轨迹进行优化、平滑处理;

结果输出的步骤:将生成的路径反馈给无人机,无人机沿规划路径飞行,将点云模型孔洞区域修补完整;

所述第六步具体实现步骤为:

(1) 在空间中使用大小相等的球体填充整个空间;

(2) 求得球体之间的交叉区域,将其作为道路图的顶点;

(3) 同属于一个球的交叉区域之间建立连线,作为道路图的边;

(4) 以球体为单位,使用蒙特卡洛光线法计算彼此间的可见度,其步骤为:

(4.1) 从当前球体上的道路图顶点随机向某一孔洞区域发出射线,记录射线中间是否与其他物体相交;

(4.2) 重复此过程,记录发出射线的总次数和光线没有遇到遮挡的次数;

(4.3) 计算没遇到遮挡的射线占总射线的比例,将该比例记为当前道路图顶点对孔洞区域间的可见度,由此构建带有可见性信息的道路图。

2. 根据权利要求1所述的面向无人机扫描重建的点云质量评价和无人机轨迹规划方法,其特征在于:所述第二步中,对获得的点云模型进行预处理方法具体如下:

首先对点云模型进行光顺去噪处理,去除扫描重建过程中的噪声点,使重建模型表面光顺平滑,并保持采样表面原有的拓扑和几何特征不变;再对点云模型的坐标系和比例进行调整,方便进一步的处理,最后通过配准方法消除点云模型中的重合点。

3. 根据权利要求1所述的面向无人机扫描重建的点云质量评价和无人机轨迹规划方法,其特征在于:所述第三步中,使用kd树将点云模型的点进行分类,得到点云中每个点的k邻点的方法步骤如下:

(1) 构造kd树的数据结构,将点云模型的数据点进行分类处理;其方法为:

(1.1) 读入点云模型数据,计算各点坐标在XYZ三轴上的最值;

(1.2) 分别计算三个轴上最大最小值的差值,选择其中相差最大的作为切割空间的超平面方向,计算中心点 c ,在 c 点处将空间分为左右两个子树;

(1.3) 按照上述方法继续对子集进行分割直到其中只剩下一个点或者 k 个点,则该点为叶子节点,最终可得到点云模型的kd树;

(2) 得到点云模型的kd树结构后可以确定每一点的 k 邻点;

(2.1) 首先计算以点 p 为球心、 R 为半径的球内的点的个数,如果点的个数大于或等于 k ,则这前 k 个点就为点 p 的 k -邻点;如果数据点的个数小于 k ,则逐渐增大 R 的值直到球内点云模型点的个数大于或等于 k ,从而得到点 p 的 k 邻点;

(2.2) 计算出点 p 的 k -邻点后,使用协方差分析的方法计算出点云模型在每个点处的法向。

4. 根据权利要求1所述的面向无人机扫描重建的点云质量评价和无人机轨迹规划方法,其特征在于:所述第四步具体步骤如下:

(1) 使用最大角度度量准则估算某点 p 是孔洞边界点的概率,其步骤为:

(1.1) 首先根据点 p 及其 k 邻点 $N(p)$ 构造点云曲面在 p 处的切平面并将点 p 的 k -邻点投影到点 p 的切平面上;

(1.2) 对点 p 的 k 邻点的投影点按照逆时针方向进行排序,按顺序用线段连接投影点和点 p ,求出投影点与点 p 连线线段的最大夹角;

(1.3) 如果最大夹角较大则是边界点,如果最大夹角较小,则是内部点;

(2) 使用半圆盘度量准则估算某点 p 是孔洞边界点的概率,其步骤为:

(2.1) 首先根据点 p 及其邻点 $N(p)$ 构造点云曲面在 p 处的切平面,然后将邻点 $N(p_i)$ 投影到切平面得到无序点集 p'_i ;

(2.2) 计算无序点集 p'_i 的质心点 g ;

(2.3) 计算质心点 g 与点 p 的距离,若距离较大则点 p 为边界点,若距离较小,点 p 为内部点;

(3) 使用形状度量准则估算某点 p 是孔洞边界点的概率,其步骤为:

(3.1) 首先根据数据点 P 及邻点 $N(p)$ 构建协方差矩阵 E ,计算出协方差矩阵 E 的特征值 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$,其中 $\lambda_0 > \lambda_1 > \lambda_2$,计算出与协方差矩阵 E 的特征值对应的特征向量 v_0, v_1, v_2 ;

(3.2) 然后对三个特征值进行归一化处理构成向量 $(\beta_0, \beta_1, \beta_2)$,使所述向量成为一个决策向量;

(3.3) 最后根据决策向量参数的大小关系来判断是否为孔洞边界特征点;

(4) 最后将三个概率加权平均,结果即为点 p 是孔洞边界点的概率。

5. 根据权利要求1所述的面向无人机扫描重建的点云质量评价和无人机轨迹规划方法,其特征在于:所述第五步中,采用搜索最近点的方法生成孔洞边界线,区分不同的孔洞,得到封闭孔洞区域的步骤为:

(1) 在边界点集 P 中随机选取一点 A 及其最近点 B 作为起始点置于集合 P_1 ;

(2) 分别计算 A 点与 B 点距离各自的最近点的长度得 l_a 与 l_b ,取较短的一边为新的扩展点加入集合 P_1 ,替换 A 点与 B 点的值,重复该操作直到集合 P 内点为空;

(3) 根据得到的集合 P_1 ,计算得到边界线长度集合 L ,长度差集合 M ;

(4) 由集合 M 中大于平均值 m 加阈值 Ψ 的元素得到一个切割集合 T ,根据集合 T ,切割孔洞

区域,得到封闭孔洞区域。

6.根据权利要求1所述的面向无人机扫描重建的点云质量评价和无人机轨迹规划方法,其特征在于:所述第七步中,基于带有可见性信息的道路图生成最佳无人机重扫描轨迹的方法为:

(1)使用可见性信息构建道路图边成本函数: $C(e_{ij}) = d(i, j) + \alpha d(i, j) (1 - v(e_{ij}))$

其中 $d(i, j)$ 是边 e_{ij} 的长度,即节点 i 和 j 之间的欧氏距离, $v(e_{ij})$ 是当前道路图顶点对于孔洞区域的可见性;

(2)使用最小化边成本函数的方法搜索找到全局最佳路径。

一种面向无人机扫描重建的点云质量评价和轨迹规划方法

技术领域

[0001] 本发明属于计算机视觉领域,特别涉及一种面向无人机扫描重建的点云质量评价和无人机轨迹规划方法。

背景技术

[0002] 目前,无人飞行器,特别是小型无人机以其安全,高机动性,成本低等特点,逐步在军用和民用方面得到了较为广泛的应用。无人机的高速发展使得高效且低成本的获取航拍图像成为了可能。

[0003] 同时,随着时代的发展,对三维物体或者场景模型的需求也越来越多。但现在以谷歌地球为代表的大多数厂商使用的是卫星照片建模得到的2.5D模型,一些重要的建筑物建模依赖人工作业,这样不仅效率低下,而且精度差强人意。如果想要获得高精度非人工的三维模型,可使用雷达建模,然而雷达的成本又过于昂贵,很难大规模推广到商用或者民用领域。

[0004] 基于点云的无人机三维场景重建技术就能解决三维场景重建中的成本问题。但是由于实际物体表面的形状复杂性及扫描设备测量过程的局限等原因,无人机扫描重建出的点云模型中时常会出现孔洞,因此如何评价点云模型找出漏洞并且修补漏洞仍需研究。

[0005] 为了实现基于三维点云模型的孔洞寻找修补,Sharf (Sharf A, Alexa M, Cohen—Or D. Context-based surface completion[J], ACM Transactions on Graphics, 2004, 23 (3): 875-887.) 等人提出了一种关于点云模型的曲面修补算法。该算法找到点云模型孔洞区域附近的数据分布特征,并将其和该点云的其它区域进行特征匹配,从而找到最相似的数据区域来对孔洞进行修补,该算法的最大缺点是计算量过大,效率不高,而且往往会由于错误匹配导致效果一般。Pavel (Pavel C, Bert J. Filling holes in point clouds[A]. In: Mathematics of Surfaces Lecture Notes in Computer Science, 2003, 2768: 196-212.) 等人提出了新的三维点云模型孔洞的修补算法。他们首先会计算每个点云数据点的邻近点并以此来确定模型的孔洞边界。然后,使用这些边界点的邻近点构造一个曲面来修补孔洞。陈飞舟 (陈飞舟, 陈志杨, 丁展, 等. 基于径向基函数的残缺点云数据修复[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18 (9): 1414-1419.) 等首次提出了一种构建Kd-树的点云模型修补算法。首先通过Kd-树来提取出三维点云模型的所有的孔洞边界点。接着使用二次曲面的特性找出孔洞的边界点序列。最后,利用径向基函数表示插值曲面,来计算存在孔洞缺陷区域的内部点云点的数据,从而实现点云孔洞的填补。但是在具体使用过程中,常常因误差过大而修补失败。

[0006] 而对于无人机轨迹规划, Kavraki (Kavraki L E, Latombe J C, Overmars M H. Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces[C] IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION. 1996: 566-580.) 等人曾在1996年提出了一种随机通路图算法 (PRM)。PRM算法所针对的是静态场景中非碰撞的路径设计问题。整个算法分为两个阶段: 构建阶段和查询阶段。构建阶段是构建出

一个没有碰撞的道路图,而查询阶段则是在构建出来的道路图上查找初始位置到目标位置的最短路径。构建阶段首先在整个场景里面随机采样取点,接着对相邻点之间进行碰撞检测,如果相邻两个点之间没有障碍物的话,就建立一条连接两点的线作为道路图的边。查询阶段就是求道路图的最短路径问题,可使用Dijkstra算法求解。PRM算法的构建阶段耗时较长且构建出来的道路图中的冗余点较多,影响查找效率。

[0007] 综上所述,目前的点云模型孔洞修补的主流做法都是先评价点云模型,找出孔洞区域,然后通过采样或插值等方法用点云模型表面完好的区域来拟合、补全孔洞区域。这样的修补方法是一种近似的修补方法,无法做到对点云模型缺失的孔洞区域实现准确的修补。而且这些方法在实际使用过程中往往伴随着效率低、误差大,孔洞修补失败率高等缺点。而其他思路例如涉及无人机轨迹规划进行点云模型重扫描修补孔洞的相关研究较为缺乏,也尚未出现效果显著且被广泛认可的其他通用方法。

发明内容

[0008] 本发明技术解决问题:克服现有技术的不足,提供一种面向无人机扫描重建的点云质量评价和无人机轨迹规划方法,可以协助无人机快速自动地重新扫描要重建的场景,生成更为精确的建筑模型,减少建筑点云模型中缺失纹理的孔洞区域。

[0009] 本发明摒弃了近似匹配修补的思路,而是从扫描得到的数据源入手,通过结合点云模型孔洞评价和无人机路径轨迹规划,找到一条更为合理、视觉死角更少的无人机飞行轨迹从而补完点云模型孔洞区域的思路。

[0010] 本发明技术方案:一种面向无人机扫描重建的点云质量评价和无人机轨迹规划方法,其关键之处分为点云模型的评价以及无人机路径轨迹生成两部分。点云模型的评价中,把输入的点云模型进行分析、评价,找出孔洞区域;无人机路径轨迹生成中,系统由场景信息以及分析得出的孔洞区域进行无人机的路径轨迹规划,进而由无人机沿规划路径飞行,将点云模型的孔洞区域扫描修复。

[0011] 具体步骤分为点云模型的获取、点云模型的评价、路径轨迹生成和结果输出四个步骤;其中:

[0012] 点云模型的获取的步骤如下:

[0013] 第一步,使用无人机扫描来获取并重建出场景原始的点云模型;

[0014] 第二步,对获得的点云模型进行预处理,包括光顺去噪、坐标系转化和模型配准等等;

[0015] 点云模型的评价的步骤如下:

[0016] 第三步,使用kd树将点云模型的点进行分类,得到点云中每个点的k邻点;

[0017] 第四步,对点云中的每个点,使用最大角度度量准则、半圆盘度量准则、形状度量准则,分别估算该点是孔洞边界点的概率,将三个概率加权平均,综合判断该点是否为孔洞边界点;

[0018] 第五步,采用搜索最近点的方法生成孔洞边界线,区分不同的孔洞,得到封闭孔洞区域;

[0019] 路径轨迹生成的步骤如下:

[0020] 第六步,基于封闭孔洞区域集合,在点云模型场景中使用球填充方法构造带有可

见性信息的道路图；

[0021] 第七步,基于带有可见性信息的道路图生成最佳无人机重扫描轨迹；

[0022] 第八步,对生成的无人机路径轨迹进行优化、平滑处理；

[0023] 结果输出的步骤:将生成的路径反馈给无人机,无人机沿规划路径飞行,将点云模型孔洞区域修补完整。

[0024] 所述第二步中,对获得的点云模型进行预处理方法具体如下:

[0025] 首先对点云模型进行光顺去噪处理,去除扫描重建过程中的噪声点,使重建模型表面光顺平滑,并保持采样表面原有的拓扑和几何特征不变;再对点云模型的坐标系和比例进行调整,方便进一步的处理,最后通过配准方法消除点云模型中的重合点。

[0026] 所述第三步中,使用kd树将点云模型的点进行分类,得到点云中每个点的k邻点的方法步骤如下:

[0027] (1) 构造kd树的数据结构,将点云模型的数据点进行分类处理;其方法为:

[0028] (1.1) 读入点云模型数据,计算各点坐标在XYZ三轴上的最值;

[0029] (1.2) 分别计算三个轴上最大最小值的差值,选择其中相差最大的作为切割空间的超平面方向,计算中心点c,在c点处将空间分为左右两个子树。

[0030] (1.3) 按照上述方法继续对子集进行分割直到其中只剩下一个点或者k个点,则该点为叶子节点,最终可得到点云模型的kd树;

[0031] (2) 得到点云模型的kd树结构后可以确定每一点的k邻点;

[0032] (2.1) 首先计算以点p为球心、R为半径的球内的点的个数,如果点的个数大于或等于k,则这前k个点就为点p的k-邻点;如果数据点的个数小于k,则逐渐增大R的值直到球内点云模型点的个数大于或等于k,从而得到点p的k邻点;

[0033] (2.2) 计算出点p的k-邻点后,使用协方差分析的方法计算出点云模型在每个点处的法向。

[0034] 所述第四步具体实现步骤如下:

[0035] (1) 使用最大角度度量准则估算某点p是孔洞边界点的概率,其步骤为:

[0036] (1.1) 首先根据点p及其k邻点 $N(p)$ 构造点云曲面在p处的切平面并将点p的k-邻点投影到点p的切平面上;

[0037] (1.2) 对点p的k邻点的投影点按照逆时针方向进行排序,按顺序用线段连接投影点和点p,求出投影点与点p连线线段的最大夹角;

[0038] (1.3) 如果最大夹角较大则是边界点,如果最大夹角较小,则是内部点;

[0039] (2) 使用半圆盘度量准则估算某点p是孔洞边界点的概率,其步骤为:

[0040] (2.1) 首先根据点p及其邻点 $N(p)$ 构造点云曲面在p处的切平面,然后将邻点 $N(p_i)$ 投影到切平面得到无序点集 p'_i ;

[0041] (2.2) 计算无序点集 p'_i 的质心点g;

[0042] (2.3) 计算质心点g与点p的距离,若距离较大则点p为边界点,若距离较小,点p为内部点;

[0043] (3) 使用形状度量准则估算某点p是孔洞边界点的概率,其步骤为:

[0044] (3.1) 首先根据数据点P及邻点 $N(p)$ 构建协方差矩阵E,计算出协方差矩阵E的特征值 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ ($\lambda_0 > \lambda_1 > \lambda_2$) 及对应的特征向量 v_0, v_1, v_2 ;

[0045] (3.2) 然后对三个特征值进行归一化处理构成向量 $(\beta_0, \beta_1, \beta_2)$, 使所述向量成为一个决策向量;

[0046] (3.3) 最后根据决策向量参数的大小关系来判断是否为孔洞边界特征点;

[0047] (4) 最后将三个概率加权平均, 结果即为点 p 是孔洞边界点的概率。

[0048] 所述第五步中, 采用搜索最近点的方法生成孔洞边界线, 区分不同的孔洞, 得到封闭孔洞区域的步骤为:

[0049] (1) 在边界点集 P 中随机选取一点 A 及其最近点 B 作为起始点置于集合 P_1 ;

[0050] (2) 分别计算 A 点与 B 点距离各自的最近点的长度得 l_a 与 l_b , 取较短的一边为新的扩展点加入集合 P_1 , 替换 A 点与 B 点的值, 重复该操作直到集合 P 内点为空;

[0051] (3) 根据得到的集合 P_1 , 计算得到边界线长度集合 L , 长度差集合 M ;

[0052] (4) 由集合 M 中大于平均值 m 加阈值 Ψ 的元素得到一个切割集合 T , 根据集合 T , 切割孔洞区域, 得到封闭孔洞区域。

[0053] 所述第六步, 具体实现步骤为:

[0054] (1) 在空间中使用大小相等的球体填充整个空间;

[0055] (2) 求得球体之间的交叉区域, 将其作为道路图的顶点;

[0056] (3) 同属于一个球的交叉区域之间建立连线, 作为道路图的边;

[0057] (4) 以球体为单位, 使用蒙特卡洛光线法计算彼此间的可见度, 其步骤为:

[0058] (4.1) 从当前球体上的道路图顶点随机向某一孔洞区域发出射线, 记录射线中间是否与其他物体相交;

[0059] (4.2) 重复此过程, 记录发出射线的总次数和光线没有遇到遮挡的次数;

[0060] (4.3) 计算没遇到遮挡的射线占总射线的比例, 将该比例记为当前道路图顶点对孔洞区域间的可见度, 由此构建带有可见性信息的道路图。

[0061] 所述第七步中, 基于带有可见性信息的道路图生成最佳无人机重扫描轨迹的方法为:

[0062] (1) 使用可见性信息构建道路图边成本函数: $C(e_{ij}) = d(i, j) + \alpha d(i, j) (1 - v(e_{ij}))$

[0063] 其中 $d(i, j)$ 是边 e_{ij} 的长度, 即节点 i 和 j 之间的欧氏距离, $v(e_{ij})$ 是当前道路图顶点对于孔洞区域的可见性;

[0064] (2) 使用最小化边成本函数的方法搜索找到全局最佳路径。

[0065] 本发明与现有技术相比的有益效果在于:

[0066] (1) 与已有的各类拟合、插值等方式实现点云模型孔洞区域数据修复的方法相比, 本发明从扫描得到的数据源入手, 通过结合点云模型孔洞评价和无人机路径轨迹规划, 找到一条更为合理、视觉死角更少的无人机飞行轨迹从而补完点云模型孔洞区域。这样得到的最终数据更为精确, 成功率高, 效率也更为让人满意。

[0067] (2) 本发明在评价点云模型阶段考虑了最大角度度量准则、半圆盘度量准则、形状度量准则三种准则计算某点是点云模型中孔洞边界点的概率, 并通过实验的方法确定了三种概率融合的权值, 提高了寻找孔洞边界点的准确性, 减少了误判的概率。

[0068] (3) 与PRM算法随机选取空白空间中的点作为道路图顶点相比, 本发明使用球填充的方法构建道路图, 确保了该道路图能够包含场景中的所有空闲区域, 避免了PRM等随机方法只能在较为局限的道路图中寻路的缺点。

[0069] (4) 本发明通过定义道路图顶点的可见性的属性,并使用蒙特卡洛光线法计算道路图顶点的可见性,再根据道路图顶点的可见性信息定义边成本函数,使得最后能够找到一条全局最优的,对孔洞区域可见性最好的路径轨迹。

附图说明

[0070] 图1为本发明的方法流程示意图;

[0071] 图2为本发明的k-邻点的平面示意图;

[0072] 图3为本发明的最大角度度量准则示意图;其中(a)为k邻点投影集合;(b)为k邻点投影点按逆时针顺序与点p连线求其夹角;(c)为内部点的夹角大小均匀;(d)边界点会有较大夹角;

[0073] 图4为本发明的半圆盘度量准则示意图;其中(a)为点p的k邻点投影到点p的切平面;(b)为内部点的k邻点同胚于圆盘;(c)为边界点的k邻点同胚于半圆盘;

[0074] 图5为本发明的形状度量准则原理示意图;(a)为特征值和特征向量构成的椭球;(b)为决策向量对应的所有特征点类型构成的三角形;

[0075] 图6为本发明的道路图构造过程示意图;(a)为使用大小相等的球体填充整个空间;(b)为球体交叉区域构成道路图的顶点;(c)为连接交叉区域作为道路图的边;(d)为计算道路图顶点的可见性;

[0076] 图7为本发明的平滑路径原理示意图。

具体实施方式

[0077] 为了更好的理解本发明的技术方案,以下结合附图和实例做进一步详细叙述。

[0078] 如图1所示,本发明提出了一种面向无人机扫描重建的点云质量评价和无人机轨迹规划方法,首先结合图1的方法流程示意图来详细介绍本发明的轨迹规划流程。

[0079] 通过对输入的点云模型进行评价,找出需要修复的孔洞区域,进而规划出修复时无人机的飞行轨迹。该方法主要功能是点云模型评价和路径轨迹生成。点云模型的评价模块是把输入的点云模型进行分析评价,找出存在缺陷的孔洞区域;无人机路径轨迹生成模块是由场景信息以及分析得出的孔洞区域进行无人机的路径轨迹规划,进而由无人机沿规划路径飞行,将点云模型的孔洞区域扫描修复。

[0080] 1. 点云模型的获取与输入方法过程如下:

[0081] (1) 由无人机对场景进行初步的扫描重建出三维场景的点云模型。

[0082] (2) 对重建得到的三维场景的点云模型进行必要的预处理,便于进一步的点云模型评价。在扫描过程中,由于无人机携带的相机视角有限,飞行轨迹不全面和其他一些因素的影响,使获得的点云数据可能存在缺陷,例如存在偏离于原模型的噪声点、采样点间存在重叠点等,因此需要对输入点云模型进行必要的预处理以方便对数据进一步的处理。包括:对点云模型进行光滑去噪处理,剔除异常点并进行滤波平滑、模型配准,合并重合点以及调整点云模型坐标,以方便对模型进一步的处理。

[0083] 2. 点云模型评价的过程如下:

[0084] 点云模型评价主要是要找出模型存在缺陷的孔洞区域。主要有以下三个步骤:

[0085] (1) 寻找每个点的k-邻点并计算该点的法向方向:

[0086] 为了加速点p的最近k个邻近点的寻找过程,构造Kd-树的数据结构,以此来确定以p为球心、R为半径的球内的点的个数。如果点的个数大于或等于k,那么这前k个点就为点p的k-邻点;如果数据点的个数小于k,则逐渐增大R的值直到球内点云点的个数大于或等于k,从而得到点p的k邻点。计算出点p的k-邻点后,可以使用协方差分析的方法计算出模型在每个数据点处的法向。

[0087] 点云模型的k-邻点:

[0088] 对于每个采样点P,将与采样点欧氏距离最近的k个采样点定义为该采样点的近邻点。设n为一个有序序列且满足

[0089] $||p_{\Pi(1)}-p|| > 0, ||p_{\Pi(i)}-p|| < ||p_{\Pi(i+1)}-p||, i \in [1, n-1]$

[0090] 则点P的k个最近邻点的对应序号为:

[0091] $N_p^k = \{\Pi(1), \Pi(2), \dots, \Pi(K)\}$

[0092] 实际上,集合 N_p^k 定义了一个以点P为中心,R为半径的球,当且仅当 $i \in N_p^k$ 时,点位于球内。如图2所示为点p的k-邻点的平面示意图:

[0093] 三维空间中建立点云的Kd-树具体步骤如下:

[0094] (1.1) 读入点云数据,计算整个点云模型数据在XYZ三个坐标上的最大和最小值,即 X_{min} 、 X_{max} 、 Y_{min} 、 Y_{max} 、 Z_{min} 、 Z_{max} 。

[0095] (1.2) 分别计算三个最大最小值的差值,选择其中相差最大的作为切割空间的超平面方向,计算中心点 $c = ((X_{max}+X_{min})/2, (Y_{max}+Y_{min})/2, (Z_{max}+Z_{min})/2)$,在c点处将空间分为左右两个子树;

[0096] (1.3) 按照上述方法继续对子集进行分割直到其中只剩下一个点或者k个点,则该点为叶子节点。否则计算该部分三个坐标轴的最大最小值 X_{min} 、 X_{max} 、 Y_{min} 、 Y_{max} 、 Z_{min} 、 Z_{max} ,然后继续返回第二步。

[0097] 利用Kd-树方法处理大规模点云数据的k-邻点能极大地提高处理的效率。通kd树的结构可以使k邻近点的搜索从树的最底层开始,然后逐渐向树上层较大的空间区域内搜索,从而达到提高搜索速度的效果。由于大部分最近点的搜索都在树的底层完成,所以运用Kd-树查找最近点可将时间复杂度从 $O(N^2)$ 降低到 $O(N \log N)$ 。

[0098] (2) 计算点云点为边界点的概率:

[0099] 综合采用最大角度度量准则、半圆盘度量准则、形状度量准则三种度量准则来估算点云中各点是孔洞边界点的概率,然后将三个概率加权合并成一个概率值,再与预先设定的阈值做对比。

[0100] (2.1) 最大角度度量准则:

[0101] 如图3所示,最大角度度量准则主要步骤为:

[0102] (2.1.1) 将k-邻点投影到所求点的切平面;

[0103] (2.1.2) 对k邻点的投影点按照逆时针方向进行排序,求出最大夹角;

[0104] (2.1.3) 如果最大夹角较大则是边界点;

[0105] (2.1.4) 如果最大夹角较小,则是内部点。

[0106] 其中边界点概率公式为:

$$[0107] \quad P_1(p) = \min\left(\frac{\beta - 2\pi/k}{\pi - 2\pi/k}, 1.0\right)$$

[0108] 其中 $P_1(p)$ 为点 p 在此准则下是孔洞边界点的概率, β 为夹角大小。

[0109] (2.2) 半圆盘度量准则:

[0110] 半圆盘度量准则通过投影点集在数据点 p 的周围均匀性来判断点是边界点的概率。如图4所示为半圆盘度量准则的示意图:(a)将 k 邻点投影到点 p 的切平面,可以看出边界点的 k 邻点同胚于半圆盘,内部点的 k 邻点则同胚于圆盘;(b)内部点的 k 邻点均匀分布,它与 k 邻点投影点的质心点差不多相一致;(c)边界点的 k 邻点偏向某一侧,它与 k -邻点投影点的质心点偏差比较大。

[0111] 具体步骤如下:

[0112] (2.2.1) 首先根据点 P 及其邻点 $N(p)$ 构造点云曲面在 P 处的切平面,

[0113] (2.2.2) 然后将邻点 $N(p_i)$ 投影到切平面得到无序点集 p'_i ,计算无序点集 p'_i 的质心点 g ;

[0114] (2.2.3) 最后用邻点 $N(p)$ 投影点的重心与 p 点的投影点的距离大小来度量 p 点属于边界点的概率,判定公式如下:

$$[0115] \quad P_2(p) = \min\left(\frac{3\pi \|g_p - p\|}{4\bar{r}}, 1.0\right)$$

[0116] 其中:

$$[0117] \quad g_p = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k p_i, \bar{r} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k r_i$$

[0118] $P_2(p)$ 为点 p 在此准则下是孔洞边界点的概率, \bar{r} 为平均半径, g_p 为质心点。

[0119] (2.3) 形状度量准则:

[0120] 形状度量准则的基本思路与前两种度量准则的基本思路截然不同,不再使用分布点的均匀性来判断,而是采用了分析 k 邻点在空间中的三个主要的方向上的变化量来判断。形状度量准则的基本思想是:协方差矩阵 E 是实对称矩阵,其特征向量构成了局部空间点云的主轴方向,特征向量对应的特征值则衡量了各个主轴方向上的变化。因此,协方差矩阵 E 的特征向量和特征值描述了邻点 $N(p)$ 逼近椭球的大小和形状。对于孔洞边界特征点和内部点,它们邻点 $N(p)$ 构成协方差矩阵 E 的三个特征值是不同的,椭球的大小和形状也是不一样的。该方法的基本步骤如下:

[0121] (2.3.1) 首先根据数据点 P 及邻点 $N(p)$ 构建协方差矩阵 E ,计算出协方差矩阵 E 的特征值 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ ($\lambda_0 > \lambda_1 > \lambda_2$) 及对应的特征向量 v_0, v_1, v_2 ;

[0122] (2.3.2) 然后对三个特征值进行归一化处理构成向量 $(\beta_0, \beta_1, \beta_2)$,使其成为一个决策向量;最后可以根据不同的决策向量对应不同的特征点来检测孔洞边界特征点。归一化

$$\text{处理公式如下: } \beta_i = \frac{\sqrt{\lambda_i}}{\sqrt{\lambda_0} + \sqrt{\lambda_1} + \sqrt{\lambda_2}} \quad (i=0, 1, 2)$$

[0123] 其中 λ_i 为第 i 个特征值, β_i 为决策向量第 i 个值。

[0124] (2.3.3) 在此基础上,可以通过决策向量对点 p 进行判断,具体如表1所示:

	特征点	决策向量
	内点	$\beta_0 \approx \beta_1 \gg \beta_2$
[0125]	角点或噪声点	$\beta_0 \approx \beta_1 \approx \beta_2 \approx 1/3$
	直线上的点	$\beta_0 \approx 1, \beta_1 = \beta_2 \approx 0$
	边界点	$\beta_0 \gg \beta_1 \gg \beta_2$

[0126] 表1形状度量准则不同数据点决策向量大小关系表

[0127] 其中点p属于边界点概率为：

$$[0128] \quad P_3(p) = \min\left(\frac{(\beta_0 - \beta_1)(\beta_1 - \beta_2)}{1/9}, 1.0\right)$$

[0129] $P_3(p)$ 为点p在此准则下是孔洞边界点的概率, β 为决策向量。

[0130] 如图5所示, 判定原理为: (a) 特征值和特征向量构成的椭球形状; (b) 决策向量对应的所有特征点类型构成的三角形, 三角形的三个顶点坐标分别为内点, 直线, 角点或噪声点。

[0131] (2.4) 加权度量准则

[0132] 上述三种检测点云模型孔洞边界点的度量准则都有各自的优劣: 半圆盘准则比其他准则更适合对较小孔洞的检测; 半圆盘度量准则和形状度量准则检测出的孔洞边界可能会出现一些冗余的点, 因此最大角度度量准则能够更加精确地更好地检测出孔洞轮廓。形状度量准则适合在点云模型存在噪点的情况下使用。为了使检测的边界点概率更加准确, 鲁棒性更好, 本发明对三种度量准则所得的边界点概率值进行加权求和, 得到一个最终的加权概率值, 即:

$$[0133] \quad \text{Pr}(p) = w_1 P_1(p) + w_2 P_2(p) + w_3 P_3(p)$$

$$[0134] \quad (w_1 + w_2 + w_3 = 1)$$

[0135] 其中 $\text{Pr}(p)$ 为三种准则下的概率加权后的点p为孔洞边界点的概率, w 为权值, 由实验确定, 分别为0.2、0.8、0.1。

[0136] (3) 区分不同的孔洞, 并生成孔洞边界线:

[0137] 在确定孔洞边界点后, 可以从任一个边界点出发, 运用搜索最近点的方法将边界点连接起来, 逐步生成孔洞边界线。

[0138] 封闭孔洞边界线的提取:

[0139] 在检测出孔洞边界特征点后, 需要将孔洞模型的边界点连接起来形成孔洞边界线, 从而区分出不同的孔洞区域。本发明采用搜索最近点的方法来生成边界线, 最终将得到的无序边界点排列成一条有序的折线。

[0140] 具体封闭孔洞边界线提取算法如下:

[0141] Step1在边界点集P中随机选取一点A作为孔洞边界起始点, 求得该点最近点B, 将两点相连, 并将两点从集合P中删除, 置于集合P1。

[0142] Step2分别计算A点与B点距离各自的最近点的长度得 l_a 与 l_b , 比较 l_a 与 l_b , 取较短的一边为新的扩展点, 将新扩展点从集合P中删除, 并加入集合P1。替换A点与B点的值。重复该操作直到集合P内点为空。

[0143] Step3根据得到的集合P1,计算得到边界线长度集合L,长度差集合M

[0144] Step4判断集合M中每个元素,若大于平均值 m 加阈值 Ψ ,并把该线段对应的两点存入切割集合T中。

[0145] Step5根据集合T,切割孔洞区域,得到封闭孔洞区域集合。

[0146] 3.路径轨迹的生成是根据找到的需要重新扫描的孔洞区域来规划无人机的飞行路径,主要分为三个步骤:

[0147] (1)构造带有可见性信息的道路图;

[0148] 如图6所示,带有可见性信息的道路图构造过程包括4个步骤:

[0149] (1.1)在空间中使用大小相等的球体填充整个空间;

[0150] (1.2)求得球体之间的交叉区域,构成道路图的顶点;

[0151] (1.3)同属于一个球的交叉区域之间建立连线,作为道路图的边;

[0152] (1.4)使用蒙特卡洛光线法计算道路图顶点的可见性。

[0153] 在本发明中,将道路图顶点的可见性定义为该顶点能看到的孔洞区域的程度。使用蒙特卡洛光线追踪算法计算道路图顶点的可见性,其具体计算步骤如下:

[0154] (1.4.1)从当前球体上的道路图顶点随机向某一孔洞区域发出射线,记录射线中间是否与其他物体相交;

[0155] (1.4.2)重复此过程,记录发出射线的总次数和光线没有遇到遮挡的次数;

[0156] (1.4.3)计算没遇到遮挡的射线占总射线的比例,将该比例记为当前道路图顶点对孔洞区域间的可见度。由此构建了带有可见性信息的道路图。

[0157] (2)基于带有可见性信息的道路图的路径轨迹生成

[0158] 路径轨迹生成是在带有可见性信息的道路图基础上规划出一条可供无人机飞行的路径。路径生成使用A*算法,这是一种广义的最佳搜索算法。A*算法使用边成本函数C来找到使成本C最小的路径。路径启发式H提供剩余路径的成本下限,可用于加速搜索。经典的最短路径A*搜索算法使用相邻点边长作为成本函数,当前点与终点的欧几里德距离作为启发式。在本发明中,我们用预先计算的可见性概率来计算边长成本,以便找到最大化可视性的路径,即能看到最多孔洞区域的路径。节点 i 和 j 之间边 e_{ij} 的代价由下式给出:

[0159] $C(e_{ij}) = d(i, j) + \alpha d(i, j) (1 - v(e_{ij}))$

[0160] 其中 $d(i, j)$ 是边 e_{ij} 的长度(即节点 i 和 j 之间的欧氏距离), $v(e_{ij})$ 是该节点沿边 e_{ij} 前进时对孔洞的可见性概率,参数 α 描述可见度信息与边长的相对成本。

[0161] 如果选择 α 过大,例如大于道路图中其他边长的最大距离,则算法将找到尽可能快地行进到可见性区域中的路径,即以可见度为主来度量边长。对于A*搜索算法中的启发式函数H,使用当前规划路径上的最末点与目的地之间的欧几里得距离: $H(n) = d(n, e)$ 。

[0162] 可见度为0到1之间的球体可能看得到所关注的孔洞区域,也可能看不到,所以对可见度在0到1之间的少数球体执行细化可以更好地优化所求得的路径。所以,本发明使用预先计算得到的可见性概率估计,在粗略路径规划期间仅需要查找该表就可得到该点的可见性概率估计。一旦粗略路径选定,其中只有少数球体的可见性概率为0到1之间,系统只需计算出这几个球体上更准确的遮挡图。从而得到更加精细的规划路径,这样大大提高了算法效率。

[0163] (3)对生成的路径轨迹进行平滑处理

[0164] 虽然粗略的航路规划和之后的路径细化操作决定了无人机大致的飞行路径,但无人机所经过的实际路径可以自由移动到所选择的球体内的任何地方,而不会与建筑物或其他物体产生碰撞或改变可见度。可以利用这些额外的自由度来平滑规划路径,创造更短和更自然的飞行轨迹。使用约束迭代平滑算法来计算最终路径位置 x_i 。

[0165] 如图7所示,首先求出每个点 x_i 的校正位置 x'_i , x'_i 为道路图顶点平面与从 x_{i-1} 到 x_{i+1} 连线的交点。如果交点位于圆的外侧,则移动到圆边界上的最近点,如图7中 x'_i 。对路径的所有点迭代地执行这些步骤。最终可以得到更为平滑,更为有效的飞行轨迹。

[0166] 4、结果输出

[0167] 结果输出,将生成的路径反馈给无人机,无人机沿规划路径飞行,将点云模型修补完整。

[0168] 本发明未详细阐述的部分属于本领域的技术人员公知技术。

[0169] 以上所述仅是本发明的优选实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

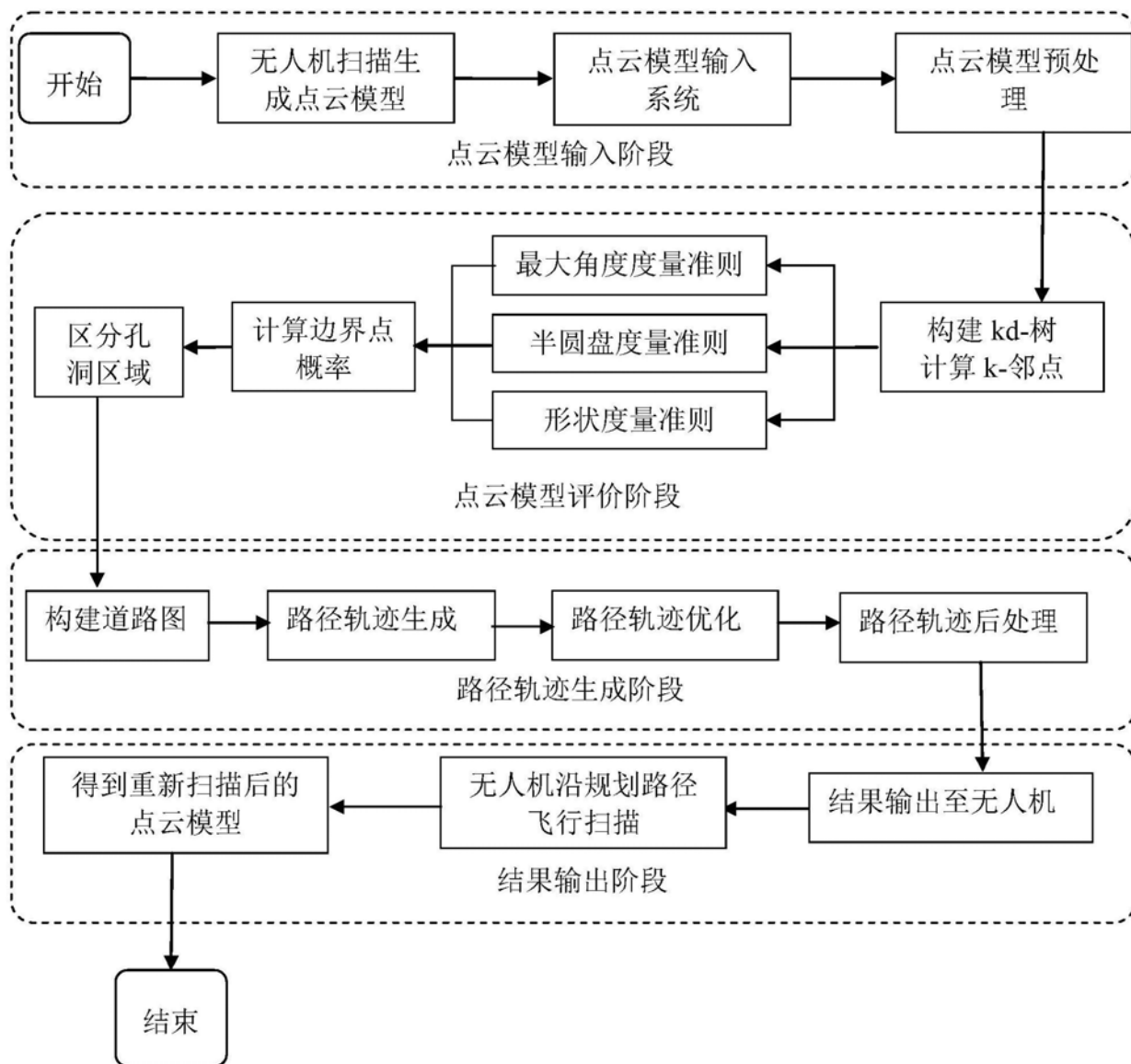


图1

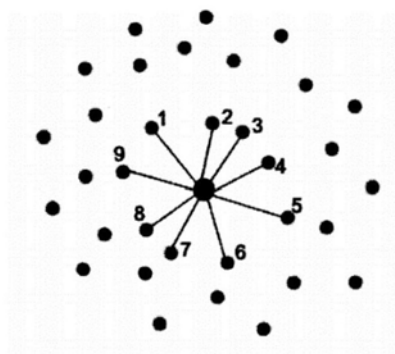


图2

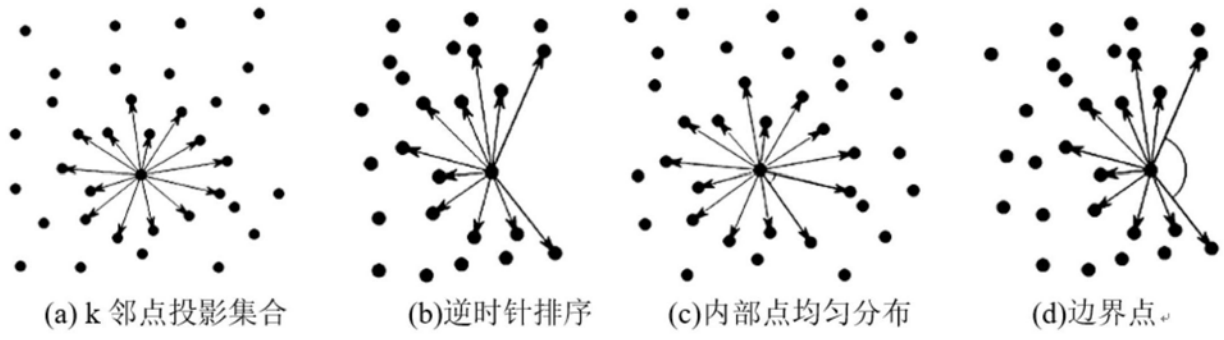


图3

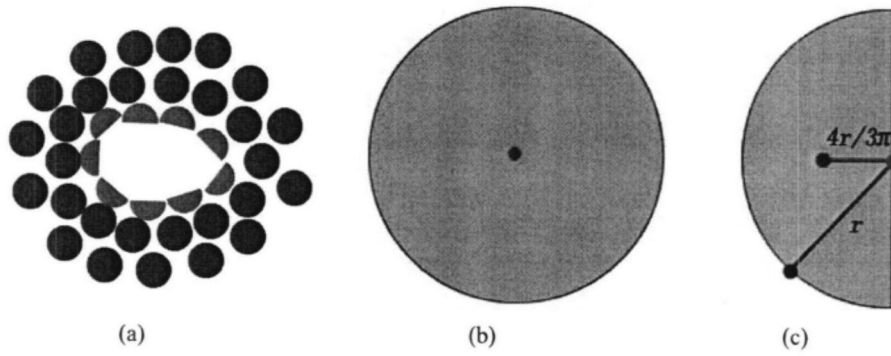


图4

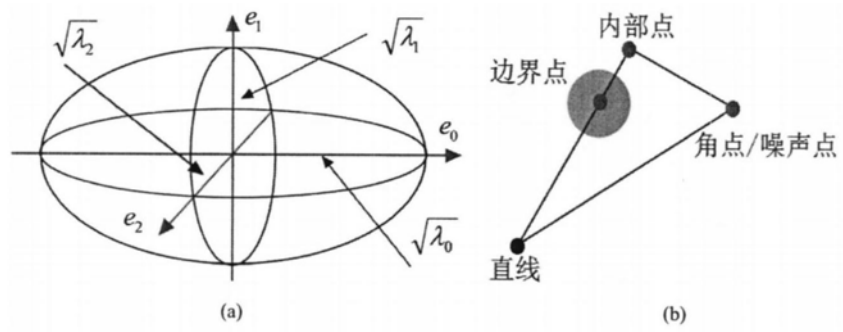


图5

