

文章编号: 1001-3806(2009)06-0642-03

激光雷达扫描数据的快速三角剖分及局部优化

未永飞¹, 杜正春^{1,2*}, 姚振强^{1,2}

(1. 上海交通大学 机械工程与动力学院, 上海 200240; 2. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 为了研究3维激光雷达测量所得点云数据的三角构网, 根据激光雷达逐行扫描特点, 采用了改进的三角剖分方法, 对点云数据进行不规则三角网格划分。基于激光雷达点云数据位置拓扑信息, 分析了相邻扫描线之间数据点的相对位置关系, 利用几何关系进行初步配对构网; 并结合经典法则对初始网格进行局部优化, 得到最终三角网; 同时, 对优化前后的三角网, 提出一种新的评价法则进行剖分效果对比。结果表明, 充分利用点云特点进行三角剖分可改进算法。所提出的剖分效果评价法可帮助检验构网质量。

关键词: 图像处理; 三角剖分; 局部优化; 点云数据; 激光雷达

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.023

Fast triangulation and local optimization for scan data of laser radar

WEI Yong-fei¹, DU Zheng-chun^{1,2}, YAO Zhen-qiang^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to study the triangulation for the point cloud data collected by a three-dimension laser radar, in accordance with the line-by-line characteristics of laser radar scanning, an improved Delaunay triangulation method was proposed to mesh the point cloud data as an irregular triangulation network. Based on the geometric topology location information among radar point cloud data, focusing on the position relationship between adjacent scanning line of the point data, a preliminary match network was obtained according to their geometric relationship. A reasonable triangulation network for the object surface was acquired by means of local optimization on initial mesh by Delaunay rule. Meanwhile, a new judging rule was proposed to contrast the triangulation before and after the optimization on the network. The result shows that triangulation for point cloud with full use of its own characteristics can improve the speed of the algorithm obviously, and the rule for judging the triangulation can be used to evaluate the quality of network.

Key words: image processing; triangulation; local optimization; point cloud data; laser radar

引言

激光雷达扫描物体可得到目标物体的表面点云数据。为实现目标曲面的重构, 首先将激光雷达测得点云数据构建出合理的不规则三角网(triangulated irregular network, TIN)^[1], TIN根据区域离散数据描述丰富的空间邻近几何关系, 如何构建合理的三角网即三角剖分算法研究是逆向工程中最重要和最困难的问题之一^[2,3]。一般方法是利用Delaunay法则构网^[4,5], Delaunay三角网所具有的性质有效地保证了最接近等

边三角网。Delaunay三角剖分法按实现过程主要分为3种^[6], 它们对计算机内存要求较高, 时间效率较低, 利用激光雷达点云数据特点, 可对算法改进, 然而相关研究较少。GAO等人^[7]针对激光雷达数据, 在AutoCAD软件环境中用最小二乘拟合方法提取边缘轮廓信息, 确定3维模型的轮廓, 但对于拟合函数的选取需预先知道目标表面的基本类型。TSE等人^[8]根据机载激光雷达测得地面数据, 利用Delaunay三角网进行构网得出地表建筑物的简单轮廓。作者基于激光雷达扫描原理, 提出1种利用相邻扫描线数据点信息进行快速的三角剖分方法, 并根据Delaunay构网法则进行优化, 对激光雷达扫描数据的快速三角剖分第1次做了系统的阐述。

1 基本思想

本文中待处理的数据为激光雷达扫描所得点云,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50805094); 国家九七三重点基础研究发展计划资助项目(2006CB705400)

作者简介: 未永飞(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事反求工程方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zedu@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2008-09-02; 收到修改稿日期: 2008-10-20

由 SICK 公司的 LMS291-S05 激光雷达,配有伺服电机、减速器和运动控制卡协调工作,实现从上到下(逐行),再从右到左(逐列)扫描,获取在设定范围区域内的数据点,最后得到 3 维数据^[9]。数据呈现扫描线特征,图 1 为一球体表面部分数据导入到 SolidWorks 软件中的图形。

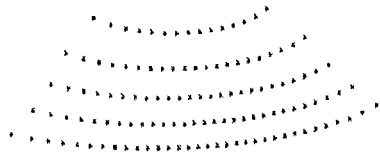


Fig.1 Scanning line model for point cloud data

由于在测量过程中逐层扫描的特点,得到的数据为规则数据,在三角剖分时充分考虑相邻扫描线间的内在位置关系,可提高三角剖分的速度与效率。首先利用扫描线的分治特性,分治算法的优点就是先将整个点集分割成数个区域,各区域内独自构网,最终逐级合并,构网速度快。数据预先已经按扫描线划分好,可认为是一个个独立子集,相邻扫描线之间的数据点可根据其固有的拓扑结构进行配对,省去搜索步骤;再利用 Delaunay 三角网规则进行局部优化(local optimization procedure, LOP);为验证优化结果的有效性,作者提出最长最小边比值均值最小法则,对优化前后的三角网进行比较。通过上述办法逐个处理相邻子集的扫描线数据,最终可快速完成整个点云数据的三角剖分。整个算法的复杂度为 $N \sim 3N$ 之间(N 表示数据点的总个数)。

2 算法描述

2.1 三角形网格的数据结构

为便于三角网格的局部优化处理,需要将激光雷达所得测量数据转化成可以被存储和修改的数据格式。

首先是顶点的定义。点云数据由激光雷达逐行扫描所得,且三角剖分时利用到了行数据的拓扑特性。因此,定义时应考虑到点所处的行、列,同时包含点的 x, y 和 z 3 维坐标。存储格式为:

i	j	x	y	z
-----	-----	-----	-----	-----

, 其中, i 表示该点在扫描数据中所处的行, j 表示该点在 i 行内所处的列, x, y 和 z 则表示该点在坐标系中的 3 维坐标。

然后是三角形的定义。由于顶点在定义时已经将其所处的行列与 3 维坐标建立了关联,因此在定义三角形时,可以将三角形的序号与其包括的 3 个顶点所处的行列建立对应的关系。三角形的存储格式为:

No.	i_1	j_1	i_2	j_2	i_3	j_3
-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------

, 其中, No. 表示该三角形序号; i_1 和 j_1 表示第 1 个顶点所处的行与列, 依次类推。三点顺序可确定三角形为顺时针连接方式,

其中 i_1 取 i , 作为三角形的起始点。

通过上述建立 $i, i+1$ 行内的三角网数据结构,各三角形序号为 No., 且与三角形顶点所处的行 i 、列 j 值建立了对应;顶点的行 i 、列 j 值已通过点定义与 x, y 和 z 值建立了对应。

2.2 初步配对构网

如图 2 所示,对于相邻扫描线 i 与 $i+1$ 两行上的

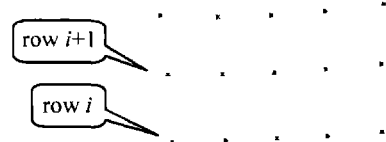


Fig.2 Row i and row $i+1$ of scanning line data

数据点,其上点数为 p 和 q , 构网前需寻找三角形对应顶点,各三角形由 i 行(或 $i+1$ 行)提供一点, $i+1$ 行(或 i 行)提供另外两点,实现数据点配对,最终可形成三角形 $p+q-2$ 个。根据 p 和 q 的大小比较,分为以下 3 种情形,对配对算法进行具体讨论。

(1) $p=q$ 时,如图 2 所示,对此情形,可采用逐个首尾相连的办法, (i, j) 即表示第 i 行上的第 j ($1 \leq j \leq p$) 个点,则可形成共有 $p+q-2$ 个三角网格,算法可表述为:三角形 $2j-1: (i, j) \rightarrow (i+1, j) \rightarrow (i+1, j+1) \rightarrow (i, j)$; 三角形 $2j: (i+1, j+1) \rightarrow (i, j+1) \rightarrow (i, j) \rightarrow (i+1, j+1)$; 其中 j 的取值范围是在 $[1, p-1]$ 。

(2) $p > q$ 时,要使得 i 行的 p 个点、 $i+1$ 行上的 q 个点完全被利用,注意到共有 $(p+q-2)$ 个三角形。从具有较少点数的行 $i+1$ 出发,考虑该行逐个点须连线段数目,可将 i 行的 p 个点完全连入三角网, p/q 值将影响各点连线的数目;由于三角形必须相邻紧凑, $i+1$ 行的相邻节点要共享 i 行的同一点(两边界点)。基于上述分析,若令: $n = (p+q-1)/q$ 取整数部分; $m = (p+q-1) \% q$, $\%$ 表示取余数部分;则 $i+1$ 行上的每个点,须保证连 n 个线段,可使得 i 行上的 $p-m$ 个点利用上,最终还剩 m 个点需要与 $i+1$ 行的数据点进行配对。

若 $m=0$,表示没有剩余点;若 $m \neq 0$,则对 $i+1$ 行剩余的 m 个点进行分配,在 i 行选择前 m 个节点与之配对。

(3) $p < q$ 时,算法与(2)一致,将 i 行与 $i+1$ 行位置互换即可。

2.3 局部网格优化

前述的初始三角剖分,对于 i 行和 $i+1$ 行的数据点,采用先配对再依次逐个相连所得,会出现局部效果不理想。采用 Delaunay 算法对局部三角网进行 LOP 优化,可改善表面质量。

2.3.1 凸四边形判定 优化前需判定两个相邻的三

角形是否构成凸四边形, LOP 优化的目标就是针对四边形进行局部优化。对于本文中的规则数据, 成行排列格式, 在优化时充分考虑其内在的拓扑关系, 局部优化限定在 i 行与 $i+1$ 行之间。

2.3.2 Delaunay 判断法则 根据 Delaunay 法则可对已剖分的四边形进行判断, Delaunay 法则主要有以下两点准则。

空外接圆准则: 设 K 是经过严格凸四边形中 3 个顶点的圆, 若第 4 个顶点落在圆 K 内, 则将第 4 个顶点与其相对应的顶点连接, 否则将另外 2 个相对顶点相连接, 如图 3a 所示。**最小角之和最大准则:** 要保证对角线连接后所形成的 2 个三角形的最小内角之和最大, 此时三角网划分为最优, 如图 3b 所示。

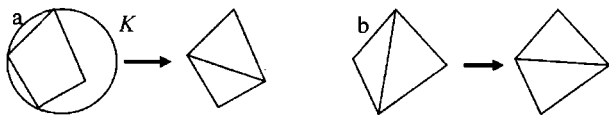


Fig. 3 Delaunay judging rule

a—empty circum-circle b—criterion of maximum sum of smallest interior angles

优化处理的过程就是将凸四边形更换对角线, 重新连成 2 个三角形。三角网局部修改后, 存储三角网信息的数组变量也作相应改变。

2.3.3 最长最短边比值均值最小法则 通过 Delaunay 法则对三角网进行局部优化后, 为验证优化结果的有效性, 确定三角网中三角形尽量接近等边三角形, 本文中提出一种最长最短边比值均值最小法则, 将优化前后的三角网进行比较。令:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{S_i}}{n} \quad (1)$$

式中, R 表示比值平均值, L_i , S_i 分别表示三角形 i 中的最长边与最短边, n 表示三角形的总个数。 R 值越接近 1, 说明三角网中三角形越接近等边三角形, 三角剖分越合理。

3 算法实现

3.1 效果图

通过上述步骤, 实现了三角网格的局部优化, 图 4 为优化前后的三角网格剖分对比, 数据点由激光雷达

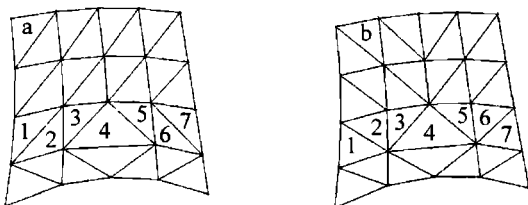


Fig. 4 Contrast of triangulation before and after optimization

a—before optimization b—after optimization

扫描数据提取部分所得。图 4a 中表示未采用 LOP 优化前, 利用基本配对构建的三角网; 图 4b 中表示利用 Delaunay 法则对先前三角网进行局部优化后的结果。

从图中比较可以看出, 利用 Delaunay 三角优化的方法, 有效地消除了狭长三角形, 使得构建的三角网接近等边三角形, 改进了三角剖分效果。

3.2 最长最短边比值均值最小法则的验证

为了说明 LOP 优化对三角剖分质量的影响, 程序对相邻行内优化前后的三角网进行了最长最短边比值对比, 仍以上述数据为基础, 以第 2、第 3 行构建的优化前后的 7 个三角形进行比较 (见图 4), 可得出如表 1 结果。

Table 1 The average ratio of the longest and shortest edge for triangulation before and after optimization

number of triangle	before optimization	after optimization
1	1.6573	1.2291
2	1.8129	1.3445
3	1.5233	1.5233
4	1.4546	1.4546
5	1.4991	1.4991
6	1.7409	1.3581
7	1.6250	1.2677
average	1.6162	1.3823

从表中数据可以看出, 优化前的三角网最长最短边比值均值超过了 1.5, 而优化后的均值仅为 1.3823; 且对于个别三角形来说, 优化后的三角网可消除凸四边形中比值超过 1.5 的三角网。

4 结论

根据激光雷达扫描特点, 充分利用数据点之间内在几何拓扑信息进行初始剖分, 省去了搜索步骤, 再利用 Delaunay 法则进行 LOP 局部优化网格得到最终三角剖分。作者提出的算法适用于处理具有扫描线特征的大规模数据点集, 如 3 坐标测量机、激光扫描等测量数据。

参考文献

- [1] WU J J, WANG Q F, HUANG Y B, *et al.* Review of surface reconstruction methods in reverse engineering [J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2004, 25(2): 133-142 (in Chinese).
- [2] OHTAKE Y, BELYAEV A, SEIDEL H P. A composite approach to meshing scattered data [J]. *Graphical Models*, 2006, 68(3): 255-267.
- [3] ZHANG M K, RAO X X, ZHONG Ch H. Reverse engineering and technology of surface reconstruction [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2006(4): 53-54 (in Chinese).
- [4] RÉMI A, RAPHAËLLE C, SAMIR A. A flexible framework for surface reconstruction from large point sets [J]. *Computers & Graphics*, 2007, 31(2): 190-204.

(下转第 647 页)

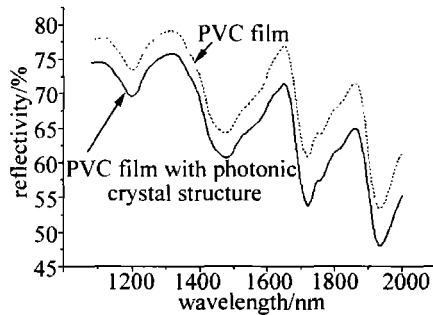


Fig. 4 Measured reflectivity of PVC film and the PVC film with photonic crystal structure

4中可以看出,在入射波长 $1.08\mu\text{m} \sim 2\mu\text{m}$ 之间有光子晶体的薄膜比没有光子晶体的薄膜反射率有了显著的降低,这与理论分析相吻合。

5 结论

运用等效介质理论研究了2维亚波长光栅的抗反射原理。2维光子晶体可以看作是由多组方向不同的2维光栅构成。通过全息法,使用3束光干涉的方法,在光刻胶上制作了六角结构的2维全息光子晶体结构。将具有2维全息光子晶体结构的光刻胶为母版采用模压的方法,将结构复制到薄膜材料上。测试结果表明,这种抗反膜在近红外波段具有增透作用,与理论分析相吻合。这类抗反射材料具有制作简单、成本低、可大批量生产等优点。但全息图的模压复制转移的浮雕条纹空间频率要求通常在 $1000\text{line}/\text{mm}$ 左右,也就是光栅周期要差不多 $1\mu\text{m}$,作者制作了主光栅周期为 $1.08\mu\text{m}$ 的光子晶体,只能在近红外波段有抗反射效

果。根据理论分析可知,如果周期能做到很小,有可能在可见波段有抗反效果,今后可以尝试制作晶格常数更小的光子晶体,以期达到更完美的实验结果。

参考文献

- [1] GRAN E B, MOHARAM M G, POMMET D A. Optical design for antireflective tapered two-dimensional subwavelength gratings structures [J]. *J O S A*, 1995, A12(2): 333-339.
 - [2] RAGUIN D H, MORRIS G M. Subwavelength structured surfaces and their applications [J]. *Proc SPIE*, 1993, CR49: 234-261.
 - [3] PETIT R. Electromagnetic theory of gratings [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1980: 258-275.
 - [4] WANG Zh H, FU K X, WEN J, *et al.* Research about antireflection characteristics of subwavelength grating [J]. *Laser Technology*, 1999, 23(1): 34-37 (in Chinese).
 - [5] RAGUIN D H, MORRIS G M. Antireflection structured surfaces for the infrared spectral region [J]. *Appl Opt*, 1993, 32(7): 1154-1167.
 - [6] SCHMID J H, CHEBEN P, JANZ S, *et al.* Gradient-index antireflective subwavelength structures for planar waveguide facets [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(13): 1794-1796.
 - [7] LIU S, ZHANG X S, CHEN X Y, *et al.* One-to-many laser fanout generated by single large-size two-dimensional holographic photonic crystal [J]. *A P L*, 2005, 87(24): 241111/1-241111/3.
 - [8] LALANNE P. On the effective medium theory of subwavelength periodic structures [J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(10): 2063-2085.
 - [9] GRAN E B, MOHARAM M G, POMMET D A. Artificial uniaxial and biaxial dielectrics with use of two-dimensional subwavelength binary gratings [J]. *J O S A*, 1994, A11(10): 2695-2703.
 - [10] LU X D, FU K X, WANG Zh H, *et al.* Design of quarter waveplate using sinusoidal dielectric subwavelength gratings [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(4): 368-370 (in Chinese).
- (上接第644页)
- [5] THIERRY D K, MARC V K, MAARTEN L. Generating realistic terrains with higher-order Delaunay triangulations [J]. *Computational Geometry*, 2007, 36(1): 52-65.
 - [6] TSAI V J D. Delaunay triangulations in TIN creation: an overview and a linear-time algorithm [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1993, 7(6): 501-524.
 - [7] GAO Zh, ZHONG S D, SONG L H. 3D-model reconstruction based on data of laser radar [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 495-499 (in Chinese).
 - [8] TSE R, GOLD C, KIDNER D. Using the delaunay triangulation/voronoi diagram to extract building information from raw LIDAR data [C]//International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering. Glamorgan, United Kingdom: IEEE Computer Society, 2007: 222-229.
 - [9] LÜ Ch F, DU Zh Ch. Chassis positioning system based on the laser radar survey technology [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6): 596-601 (in Chinese).