

基于局部体积最大的轮廓线三维形体重构算法

刘 刚,袁纪武,李 磊,王伟强

(中国石油化工股份有限公司 青岛安全工程研究院,山东 青岛 266071)

摘 要:提出一种以局部体积最大为约束条件的轮廓线拼接算法。该算法以上下轮廓线各顶点的每次连接都保证对整个形体体积作出最大贡献为条件,以相对应的两条轮廓线线段的叉积运算值为依据,判断将要连接的两条可能跨距哪条更靠近形体的外侧,取外侧线段为拼接线段,最终完成所有轮廓线的拼接。

关键词:三维重构;局部体积最大;轮廓线;拼接算法;叉积

中图分类号:TP391.4

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)03-0049-05

The 3D Reconstruction Algorithm of Outlines Based on the Locally Greatest Volume

LIU Gang, YUAN Jiwu, LI Lei, WANG Weiqiang

(Qingdao Institute of Safety Engineering, SINOPEC, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: The paper introduced a tiling algorithm of outlines taking the locally greatest volume as a constraint condition. Taking every connection of vertexes in outlines up and down which make the maximum contribution to the whole volume as a condition, and the operation values of crossed products of corresponding segments in outlines as a basis, the algorithm takes the outside segment as tiling segment believing that the segment is the outside one of the body in likely two spans to be connected and, at last, completing all tiling tasks of outlines.

Key words: 3D reconstruction; the locally greatest volume; outline; tiling algorithm; crossed products

许多学科领域都需要收集和使用物体的表面数据信息,如古生物学家把化石切片获取化石的外形图像,地质学家使用地音听器获取地质结构的密度信息等。在通过各种测量方法获得物体表面数据之后,人们更期望能从这些数据重构出三维物体的表面特征,即三维重构。三维重构的方法有很多种,如直接体视化、构造等值面等。其中,基于二维轮廓数据的三维形体重构是当前的研究方向之一。

基于轮廓数据的三维形体重构需要解决四个基本问题,即轮廓拼接问题、对应问题、分叉问题以及曲面拟合问题^[1]。其中,轮廓拼接是三维形体重构的关键所在。本研究在分析轮廓拼接基本原理与现有拼接技术的基础上,提出一种以局部体积最大为约束条件的轮廓线拼接算法。

1 轮廓线拼接基本问题描述

假设两相邻平行平面上各有一轮廓线,上、下轮廓线的点列分别为 P_0, P_1, \dots, P_{m-1} 及 Q_0, Q_1, \dots, Q_{n-1} 。如果将上述顶点依次用直线段连接起来,则得到这两条轮廓线的多边形近似表示。线段 $P_i P_{i+1}$ 或 $Q_j Q_{j+1}$ 称为轮廓线线段。如图 1 所示,连接上轮廓线上一点与下轮廓线上一点的线段称为跨距。很显然,一条轮廓线线段,以及将该线段两端点与相邻轮廓线上的一点相连的两段跨距构成一个三角面片,称为基本三角面。而该两段跨距则分别称为左跨距和右跨距。实现两条轮廓线之间的三维面重构就是要用一系列相互连接的三角面片将上、下两条轮廓线连接起来^[2]。

收稿日期:2011-01-07

作者简介:刘 刚(1978—),男,吉林辉南人,助理工程师,主要从事虚拟现实技术和图形图象处理等方面的研究。

E-mail:lg6121@163.com.

Fuchs^[3]指出,只有满足下列3个条件的三角面片集合才是合理的:

1) 每一个轮廓线线段必须在而且只能在一个基本三角面片中出现。如果上、下两条轮廓线各有 m 个和 n 个轮廓线段,那么,合理的三维表面模型将包含 $m+n$ 个基本三角面片。

2) 如果一个跨距在某一基本三角面片中为左跨距,则该跨距是而且仅是另一个基本三角面片的右跨距。

3) 各面片之间不允许自交。

Fuchs 将符合上述条件的三角面片集合称为可接受的形体表面。显而易见,这样的表面可以有多种不同的组合。

2 现有的轮廓线拼接技术

在众多的可接受表面组合中,Fuchs 等^[3]用优化方法来确定可接受表面,并假定优化目标是两平行平面的轮廓线之间生成的表面积最小。Kepple 等^[4]则是以两平行平面的轮廓线之间连接生成的表面所包围的体积最大作为优化条件。以上两类方法都是在一个有向图中寻找一条最优路径,最优路径对应最佳的表面逼近,对于两个相似性很好的轮廓线一般可以得到一个很好的结果,但是无论哪一种方法都需要用全局搜索策略来求解,故计算量大、效率不高。

后来,Christiansen 等^[5]提出了一种局部的启发式方法,这种方法采用局部的判定规则构造三角形。目前提出的局部判定规则有最短对角线法、同步前进法、相关模型法等。其中,最短对角线法由 Christiansen 等^[5]提出,是用最短对角线来构造两轮廓线间的三角面片。该方法易于实现,当轮廓线的大小和形状相近时,效果很好,但是在较为复杂的情况下该方法并不理想(图2)。Ganapathy 等^[6]提出了利用相邻轮廓线同步前进法进行轮廓线的拼接。Cook 等^[7]提出利用轮廓线采样点中心方向角度相近程度来构造三角片的局部优化方法。相对于全局优化方法,这类方法计算量小,对于相似性较好的相邻断层轮廓线能够得到较好的结果。

Kehtarnavaz^[8]最早提出了分段确定相邻层两轮廓的对应点的思想,后来 Sinclair^[9]和 Choj^[10]也应用了这一思想。Fix^[11]则提出了一种多分辨率的一对一分段处理方法。Marsafen 等^[12]采用分段参数曲面如 Nurbs 曲面来拟和重建表面。

另一种轮廓线拼接的方法是利用轮廓线匹配的思想,即对于其中一个轮廓上的每一个点,在另一个相邻轮廓线上相应地找到一点与其相匹配。当两个对应的轮廓线在形状、位置、方向不同时,需要进行形变匹配,一种解决形变匹配的方法是弹性匹配^[13]。管伟光^[14]对此进行改进并提出一种基于线性弹性模拟的形变轮廓匹配方法。

上述的轮廓线拼接方法都有各自的优缺点,不能保证在所有的情况下都能得到期望解,因而需要根据实际情况进行必要的调整。本研究提出的轮廓线拼接算法属于局部启发式方法,是以上下轮廓线各点的每一

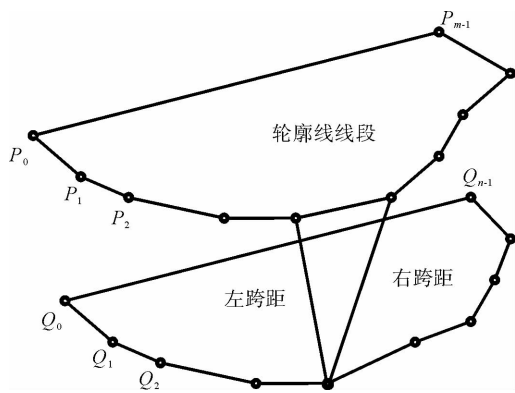


图1 轮廓线重构基本原理示意图

Fig. 1 The sketch of the rationale for outline reconstructions

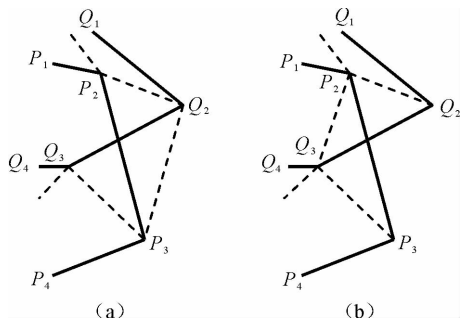


图2 局部体积最大轮廓拼接算法原理示意图

Fig. 2 The sketch of the locally greatest volume

次连接都保证对形体体积作出最大贡献为条件进行的。

3 基于局部体积最大的轮廓线拼接算法

3.1 基本思路

假设 Q_1, Q_2, \dots, Q_n 和 P_1, P_2, \dots, P_m 分别为上、下轮廓线上的各个顶点, 已知 P_2, Q_2 两点已连接完毕, 接下来需要确定是由 P_2 连接 Q_3 点还是 Q_2 连接 P_3 点? 由图 2 可以看出, P_2, P_3 与 Q_2, Q_3 构成上、下轮廓线上两条互不相交的空间线段, 如果将线段 Q_2P_3, P_2Q_3 与 Q_3P_3 分别连接起来, 则得到一个四面体。在线段 P_2P_3 与 Q_2Q_3 相互之间不平行时, 所得到的四面体体积必然大于零, 在这里, 将这样的四面体体积称为局部体积。

对于最终所要获得的三维形体来说, 如果连接靠近内侧的两点 P_2Q_3 (图 2(b)), 则上述四面体的体积 (局部体积) 对整个形体体积无任何贡献, 约定该四面体体积 (局部体积) 值为负; 如果连接靠近外侧的两点 Q_2P_3 (图 2(a)), 则上述四面体的体积 (局部体积) 对整个形体体积有贡献, 约定由此形成的四面体的体积 (局部体积) 值为正, 这样的体积就是局部最大体积, 这样的轮廓线连接则满足局部体积最大的要求。从视觉的角度看, 图 2(a) 要比图 2(b) 形状显得更加饱满, 更符合实际物体沿轮廓线渐进变化的要求。

以局部体积最大 (为正) 为条件的轮廓线拼接算法正是基于上述考虑, 即上、下轮廓线顶点的每一次连接都由此产生的跨距的左右三角面所构成的四面体体积对整个形体体积作出最大贡献为条件。

3.2 叉积的概念

实现上述构想的关键是上下顶点的每次连接都选择相对形体来说靠近外侧的那一条边。为达到这一目的, 首先应了解叉积的概念^[15]。

考察图 3 的 2 个向量 P_1 和 P_2 。把叉积 $P_1 \times P_2$ 看作是由原点 $(0, 0)$, P_1, P_2 和 $P_1 + P_2$ 围成的平行四边形的阴影面积, 即: $P_1 \times P_2 = X_1 \times Y_2 - X_2 \times Y_1 = -(P_2 \times P_1)$ 。

对原点 $(0, 0)$ 来说: ①若向量 P_1 在向量 P_2 的顺时针方向, 则叉积 $P_1 \times P_2 > 0$; ②若向量 P_1 在向量 P_2 的逆时针方向, 则叉积 $P_1 \times P_2 < 0$; ③若 P_1, P_2 共线 (方向可以相同或相反), 则叉积 $P_1 \times P_2 = 0$ 。

如果公共端点 P_0 不在原点上, 仅需将原点平移至 P_0 即可。若平移后得到的叉积为正, 则 $\overrightarrow{P_0P_1}$ 在 $\overrightarrow{P_0P_2}$ 的顺时针方向; 若该叉积为负, 则 $\overrightarrow{P_0P_1}$ 在 $\overrightarrow{P_0P_2}$ 的逆时针方向。

3.3 算法实现

算法的具体实现步骤如下 (图 4)。

1) 选出轮廓线拼接的起始基准点。这里约定, 将上、下轮廓线的最小 X 值点 Q_0, P_0 定义为起始基准点, 这样可以保证轮廓线的首次连接对将要获得的三维形体的体积贡献为正 (局部体积最大)。连接 P_0, Q_0 点, 该线段为起始基准线, 同时将该线段定义为第一条拼接基准线。拼接基准线的端点用 P_i, Q_j 来表示 (i, j 分别代表拼接基准线上下两端点的序号)。

2) 顺时针方向依次排定其余顶点的处理顺序 (P_0, P_1, \dots, P_{m-1} 及 Q_0, Q_1, \dots, Q_{n-1})。

3) 将 P_iP_{i+1} 沿拼接基准线 P_iQ_j 空间平移, 使 P_i 点与 Q_j 点重合, P_{i+1} 点相应平移至 P'_1 点处。

4) 计算向量 $\overrightarrow{Q_jP'_1}$ 与 $\overrightarrow{Q_jQ_{j+1}}$ 的叉积 $\overrightarrow{Q_jP'_1} \times \overrightarrow{Q_jQ_{j+1}}$ 。若此叉积值为负, 则 $\overrightarrow{Q_jP'_1}$ 在 $\overrightarrow{Q_jQ_{j+1}}$ 的逆时针方向, 由此推之 P_iP_{i+1} 在 Q_jQ_{j+1} 的逆时针方向上, 即 P_iP_{i+1} 比 Q_jQ_{j+1} 更靠近三维形体的外侧, 或者说 P_{i+1} 点比 Q_{j+1} 点更靠近三维形体的外侧。在此情况下, 跨距 Q_jP_{i+1} 必然比跨距 P_iQ_{j+1} 更靠近三维形体的外侧, 故连接 Q_j, P_{i+1} 点, 并将此线段定义为新的拼接基准线。若叉积值为正, 则跨距 P_iQ_{j+1} 比 Q_jP_{i+1} 更靠近三维形体的外

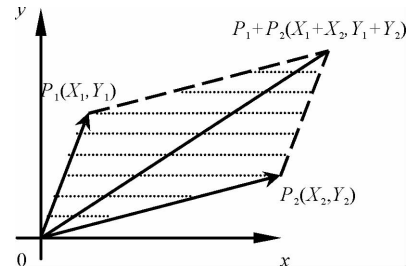


图 3 P_1, P_2 向量坐标示意图
Fig. 3 The sketch of vector coordinates

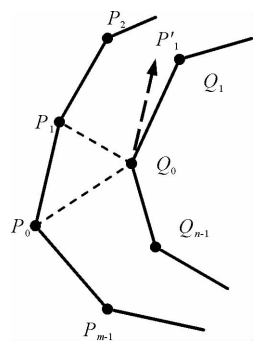


图 4 算法实现步骤示意图
Fig. 4 The sketch of the process for the algorithm

侧,故连接 P_i, Q_{j+1} 点,并将此线段定义为新的拼接基准线。若叉积值为零,则跨距 $P_i Q_{j+1}$ 与 $Q_j P_{i+1}$ 必在同一平面上,此时局部体积值为零。在此情况下,比较跨距 $P_i Q_{j+1}$ 与 $Q_j P_{i+1}$ 长度大小,连接较短的那条跨距,再将此线段定义为新的拼接基准线。

5)若拼接基准线回到起始基准线 $P_0 Q_0$,则执行 6);否则,执行 3)。

6)轮廓线拼接完毕,结束算法。

4 实验结果

4.1 拼接效果的质量评价

合理性、局部效果和整体效果是评价三维形体重构质量的 3 个要素。如果将这 3 个要素继续细分,可以得出,一个整体效果较好的重构结果应满足以下 6 个条件:①每一个轮廓线线段必须在而且只能在一个基本三角面片中出现;②如果上、下两条轮廓线各有 m 个和 n 个轮廓线段,则合理的三维表面模型将包含 $m+n$ 个基本三角面片;③如果一个跨距在某一基本三角面片中为左跨距,则该跨距是而且仅是另一个基本三角面片的右跨距;④各三角面片之间不能相交;⑤每个三角面片的形状应尽量均匀,尽可能避免出现狭长三角形;⑥相邻两条轮廓线之间应尽可能保持自然过渡。若只满足条件①—④则认为该重构结果是合理的,满足条件①—⑤则认为该结果局部效果较好,只有以上 6 个条件均满足才认为该结果的整体效果较好。

然而,上述条件仍然只是理论上的抽象定义,还需要将它们量化为具体的参数指标,才能进行真正意义上的三角网格构造质量的评价工作。在一般情况下,不满足条件①或条件②的重构结果很少会出现,故评价参数中对这 2 个条件可以先不予考虑。表 1 给出了衡量条件③—⑥的 4 个参数,分别是网格数比、相交网格比、狭长三角比与轮廓面积比(或轮廓周长比)。

表 1 评价三角网格构造质量的参数表

Tab. 1 The parameters of appraising the quality of triangulated grids

三角网格质量评价参数	最优值	说明
网格数比 $W = \frac{\text{实际生成的三角网格数}}{\text{理论上应生成的三角网格数}}$	1	① $W=1$ → 重构结果合理;② $W < 1$ → 重构结果不合理。
相交网格比 $X = \frac{\text{相交的三角网格数}}{\text{三角网格总数}}$	0	① $X=0$ → 无相交,结果合理;② $0 < X \leq 1$ → 有相交,结果不合理;③某些情况下,允许少量相交。
狭长三角比 $C = \frac{\text{狭长三角网格数}}{\text{三角网格总数}}$	0	该比值越小其局部效果越好,即单个三角网格的形态越均匀。
轮廓面积比 $M = \frac{\text{插值轮廓的平均面积}}{\text{上下轮廓的平均面积}}$	1	该比值越接近于 1 其整体效果越好,即上下轮廓线之间的过渡越自然。轮廓面积比 M 比轮廓周长比 Z 更能体现整体效果的好坏。
或轮廓周长比 $Z = \frac{\text{插值轮廓的平均周长}}{\text{上下轮廓的平均周长}}$	1	

4.2 几种拼接算法的实验结果比较

图 5 给出了复杂情况下的两条相邻轮廓线,它们具有个体形态复杂、相互之间相似性、对中性较差等特点。图 6 分别给出了使用同步前进法、局部体积最大法以及最短对角线法拼接上述轮廓线的实验结果图。通过计算评价三角网格构造质量的 4 个参数,表 2 对采用上述 3 种算法的实验结果进行了比较。其中,图 6(a)采用同步前进法,所构造的三角面片在 p 点附近存在小范围的相交;图 6(b)采用本文方法即局部体积最大法,所得到的三角面片满足 4.1 节中的合理性条件①—④,因此是合

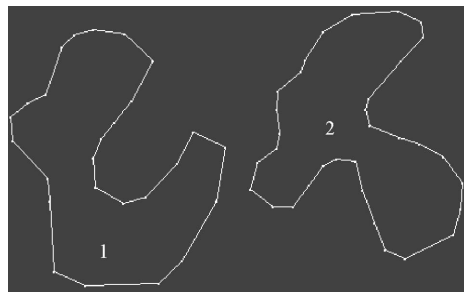


图 5 复杂轮廓线示意图

Fig. 5 The sketch of the complicated outlines

理的重构结果;图 6(c)采用最短对角线法,所构造的三角面片在 p 点、 q 点附近存在较大范围相交,是不合理的三维重构结果。同时,图 6(b)的整体效果与局部效果也都较为理想。

表 2 采用不同轮廓线拼接算法构造三角网格的实验结果比较表

Tab. 2 Comparisons among the experimental results in triangulated grids constructions with three different outline tiling algorithms

算法	参数	网格数比	相交网格比	狭长三角比	轮廓面积比
同步前进法(图 6(a))		59/59=1	15/59=0.254	9/59=0.153	291.1/367.3=0.793
局部体积最大法(图 6(b))(本文方法)		59/59=1	0/59=0	5/59=0.085	349.7/367.3=0.952
最短对角线(图 6(c))		59/59=1	22/59=0.373	33/59=0.559	180.2/367.3=0.491

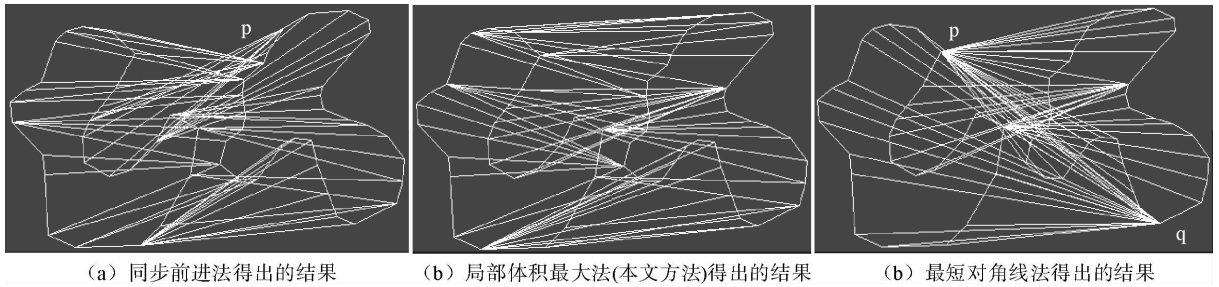


图 6 采用三种不同轮廓线拼接算法得出的结果示意图

Fig. 6 The sketch of results with three different outline tiling algorithms

参考文献:

[1]MEYERS D,SKINNER S,SLOANI K. Surfaces from contours[J]. ACM Transactions on Graphics,1992,11(3):228-258.
 [2]唐泽圣. 三维数据场可视化[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
 [3]FUCHS H,KEDEM Z M,USELTON S P. Optimal surface reconstruction from planar contour[J]. Communication of the ACM,1977,20(10):693-702.
 [4]KEPPEL E. Approximating complex surfaces by triangulation of contour lines[J]. IBM Journal of Research Development, 1975,19(1):2-11.
 [5]CHRISTIANSEN H N,SEDERHERG T W. Conversion of complex contour line definitions into polygonal element mosaics [J]. Computer Graphics,1978,12(2):187-192.
 [6]GANAPATHY S,DENNEHY T G. A new general triangulation method for planar contours[J]. Computer Graphics,1982, 16(3):69-75.
 [7]COOK L T,DWYER S A. Three display system for diagnostic imaging application[J]. IEEE Computer Graphics and Applications,1983,3(4):345-348.
 [8]KEHTARNAVAZ N A. Syntactic/semantic technique for surface reconstruction from cross-sectional contours[J]. Graphical Models and Image Processing,1988,4(2):399-409.
 [9]SINCLAIR B. Complex contour organization for surface reconstruction[J]. Computer & Graphics,1989,13(3):311-319.
 [10]CHOI Y K. Band partitioning algorithm for surface reconstruction from planar contours[J]. Electronics Letters,1999,35 (20):1713-1714.
 [11]FIX J D. Multiresolution banded refinement to accelerate surface reconstruction from polygons[J]. Computational Geometry,1999,13:49-64.
 [12]MARSAFEN A L,DUTTA D. Computational techniques for automatically tiling and skinning branched objects[J]. Computer Graphics,1999,23:111-126.
 [13]MOSHFEGHI M. Matching of multimodality medical images[J]. Graphical Model and Image Processing,1991,53(3):53-57.
 [14]管伟光,马颂德. 具有形变的平面轮廓匹配问题[J]. 自动化学报,1994,22(6):666-671.
 GUAN Weiguang,MA Songde. Matching deformed planer contours[J]. Acta Automatica Sinica,1994,22(6):666-671.
 [15]吴文虎,王建德. 实用算法的分析与程序设计[M]. 北京:电子工业出版社,1998.