Machine Graphics and Vision，第13卷，第3期，波兰科学院，第13卷，第3期，第221-233页，ISSN 1230-0535，2004年

基于正交切片的鲁棒表面重建

Radek Sviták[1], Václav Skala[2]比尔森西波希米亚大学计算机科学与工程系，Univerzitní 8，306 14 比尔森，捷克共和国 电子邮箱：rsvitak@kiv.zcu.cz

摘要

本文介绍了如何根据表示三维物体横截面的平面平行切片组进行表面重建。表面重建的最终结果始终取决于对原始物体结构的正确估计。本文通过案例研究探讨结构确定问题，并提出一种基于考察相互正交的切片组的新方法。文中介绍了一种利用正交切片进行表面重建的新方法，并讨论了正交切片的优势，同时展示了相关特性和示例结果。

1. 引言

从切片进行表面重建的关键任务，是正确估计原始物体的结构，即解决轮廓对应问题。现有的大多数方法只是将一对连续平行切片中的轮廓重叠情况视为唯一的对应准则。因此，当物体轴线与切片法线之间的夹角增大时，这些方法会给出不可接受的结构估计。

提高切片密度有助于解决这一问题，但由于扫描设备的分辨率限制等原因，并非总能做到。显然，位于非平行平面上的其他切片可以提供额外信息。本文将重点探讨正交切片对重建过程的益处。与现有方法相比，我们目前取得的结果表明，对于一组物体，生成曲面在.....方面明显更加精确

与原始曲面的相似性。

介绍了所提出的新方法的概念及其结果

此外，还将讨论与现有方法的比较。

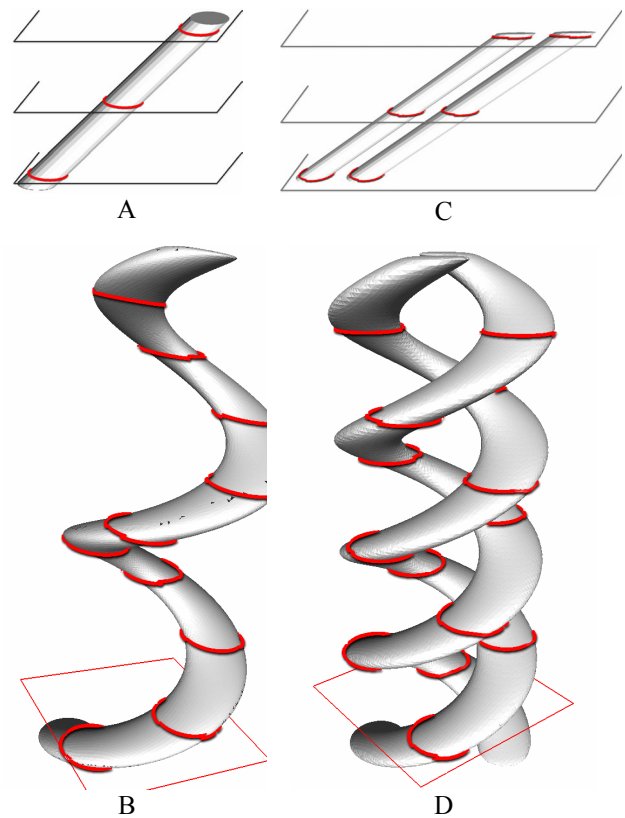

图1：求解轮廓对应问题时的棘手情况。使用重叠判据时可能遇到的问题：A、B、C、D；广义圆柱：B、D；最小生成树：C、D；基于Reeb图的方法：D。

本研究得到捷克共和国教育部项目资助：[1]FRVŠ 1348/2004/G1[2]MSM 235200005

2. 现有方法简述

自 1970 年前后以来，人们已经开发出多种从切片进行表面重建的方法。本节将根据这些方法解决轮廓对应问题的思路对其进行分类。有关从其他角度对现有方法进行更深入的研究，请参见 [2, 4, 6, 7]。

最简单的方法是在每对相邻等高线之间局部估计轮廓对应关系。通常，将彼此重叠的等高线视为相互对应。如果切片密度较高，即切片之间的距离较小，且输入物体的轴线几乎垂直于切片平面，这种方法就适用。

一种更先进的方法使用广义椭圆柱来解决对应问题 [1, 11, 12]。首先，根据轮廓周长上的顶点与椭圆的拟合程度，将轮廓分为椭圆形或复杂形。若拟合效果太差，则将轮廓归类为复杂形，无法将其纳入椭圆柱中。随后，将椭圆归入圆柱。当尽可能多的轮廓都被组织到圆柱中后，算法便利用圆柱之间的几何关系，将它们归组为物体。这种方法最适用于细长、表面光滑且横截面大致呈椭圆形的物体。

显然，已发表的现有方法中，效果最好的似乎是两种基于图的方法。Skinner 提出的第一种方法 [10] 根据轮廓形状和位置计算一棵最小生成树。首先，将每条轮廓表示为一个节点，并将每个节点与代表相邻截面中轮廓的所有节点相连，从而构建一张图。然后，为每条轮廓计算最拟合的椭圆。图中一条边的代价取决于两个椭圆的相对位置和大小：

$$c(i,j)=(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2+(a_i-a_j)^2+(b_i-b_j)^2,$$

其中，(x_i, y_i, z_i) 和 (x_j, y_j, z_j) 分别表示轮廓*i*和*j*所对应椭圆的中心，a_i、b_i、a_j、b_j 是它们的长轴以及短轴长度。

为该图计算出的最小生成树代表了对应问题的解。该方法适用于天然树状结构物体，但其主要局限在于无法正确解决一般图拓扑中的对应问题，例如亏格为 > 0。

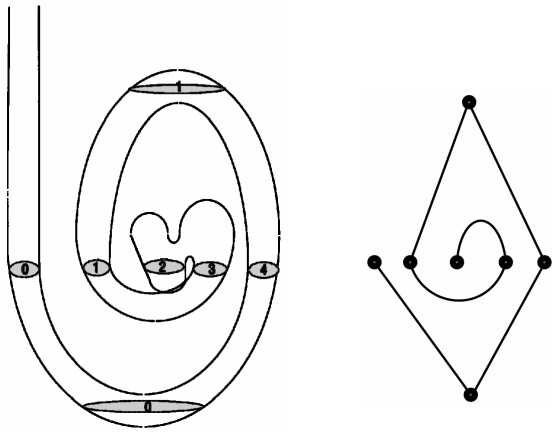

图 2：A）耳蜗切片数据集。利用 Reeb图可以检测并表示正确的轮廓对应关系。其优点在于能够考虑同一切片中轮廓之间的对应关系（B）。摘自 [8]。

Shinagawa [8, 9] 提出的第二种基于图的方法，采用基于 Morse理论的曲面编码来构建表示轮廓连通性的*Reeb*图 [14] 。每条轮廓对应图中的一个节点，图中的边表示轮廓对应关系。添加边时，会避免建立可能导致曲面不再是二维流形的连接。对于每一对可以合法连接的轮廓，都会计算一个权重函数，并根据其取值确定连接这对轮廓的优先级。算法首先在各截面轮廓数量不变的区域内建立优先级最高的连接，然后依据对先验知识——即连通分量的数量和拓扑亏格——按优先级递减的顺序添加连接。

需要强调的是，现有解决方案都只是估计轮廓对应关系，也就是原始对象的结构。图1展示了一些典型的数据集，用以说明本节所述方法的能力。

3. 正交切片

一组平行平面切片是三维物体众所周知的边界表示之一。通常，这类切片组的平面垂直于z轴，因此被称为*z*切片。

如果我们使用不止一组平行切片对物体进行切片，并且这些切片组彼此正交，就会得到正交切片组。现在考虑一个物体的*z*切片、*x*切片和*y*切片，见图3。注意，等高线应为多边形，并按照以下方式定向：从给定切片组轴的正方向观察时，等高线内部位于左侧，外部位于右侧，见图4。

3.1 轮廓对应关系

正交切片的主要优势在于确定轮廓对应关系的方法。需要强调的是，彼此相交的两条正交等高线显然来自输入物体的同一个曲面分量。这意味着轮廓的交集非常重要，因为它能够提供关于正确结构的准确信息，见图5。

显然，如果正交切片组中的切片对物体进行了充分采样，那么正交切片中轮廓的交点就能准确确定对应关系，即原始物体的正确结构。

4. 算法

切片平面将空间划分为由空间网格 *M*构成的一组空间单元。图3中可以看到三个彼此正交的平面

网格*M*。我们将*M*的单元分为两类：曲面交叉单元和曲面穿过单元。曲面交叉单元的某些侧面上存在部分轮廓，这意味着生成曲面与该单元相交
单元，见图6。

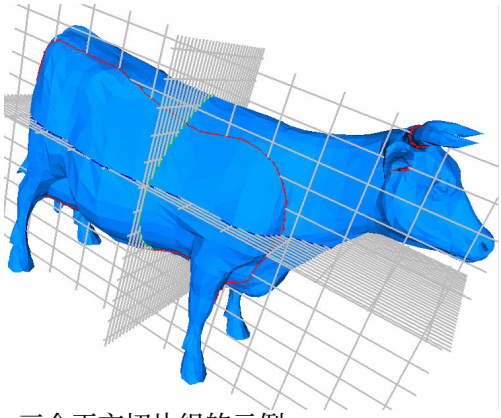

图3：三个正交切片组的示例。

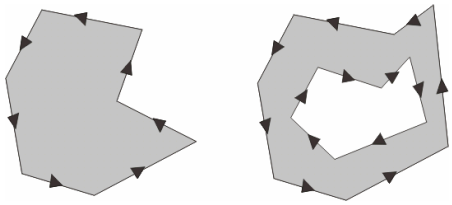

图4：正确的轮廓方向。

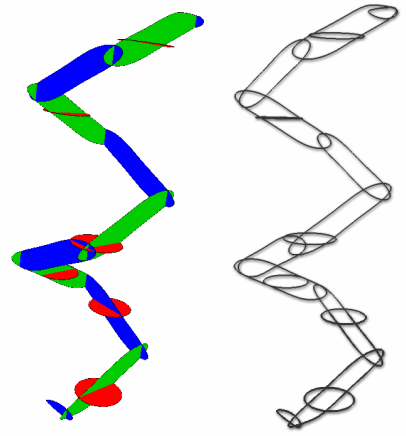

图5：正交轮廓的相互交叉确定了对应关系。

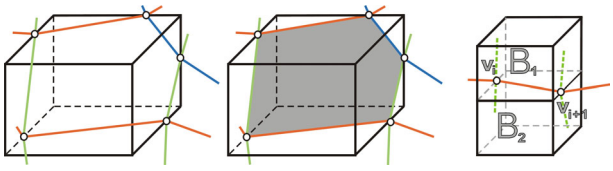

图6：一个曲面交叉单元。单元侧面的部分轮廓与节点共同构成空间多边形。节点以白色圆圈表示。G 的每条边都与*M*中的两个单元相邻。

由曲线轮廓组成的两个正交切片的交集是一组点，我们称其为节点，见图7。现在我们聚焦于曲面交叉单元。一个重要观察是，输入轮廓的部分片段与节点构成空间多边形。每个这样的多边形都被包围在一个曲面交叉单元内，其面片是生成曲面的一部分，见图6。

4.1 对应问题

此处我们假设，正如第3.1节所讨论的，正交轮廓的交点已足以确定轮廓之间的对应关系。

将两个轮廓的交点视为对应关系。请注意，由此类关系构建的图的连通分量数量，对应于生成曲面中不相连分支的数量。

4.2 节点计算

节点在几何上是两条等高线的交点。在拓扑上，它是轮廓对应关系的表示。每个节点都必须位于网格 M 的边上。由于等高线被假定为多边形曲线，我们无法直接计算两个正交截面的交点。我们分两个阶段得到这些交点。

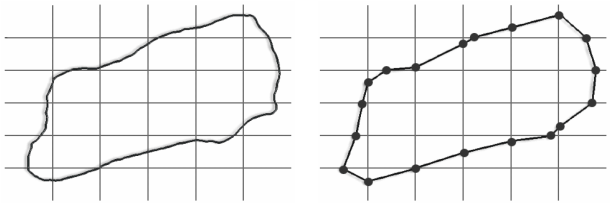

图7：A）输入轮廓，格点阵列表示正交切片平面的位置。B）由其节点（黑点）构成的轮廓。

第一步，计算每条等高线与网格 M 的交点。随后将这些交点添加到当前等高线顶点中相应的位置，同时将它们登记在网格 M 对应的边上。我们的算法采用与 Cohen-Sutherland 线段裁剪算法 [3] 相同的原理。

一个切片平面与所有其他正交切片平面的交集构成一个

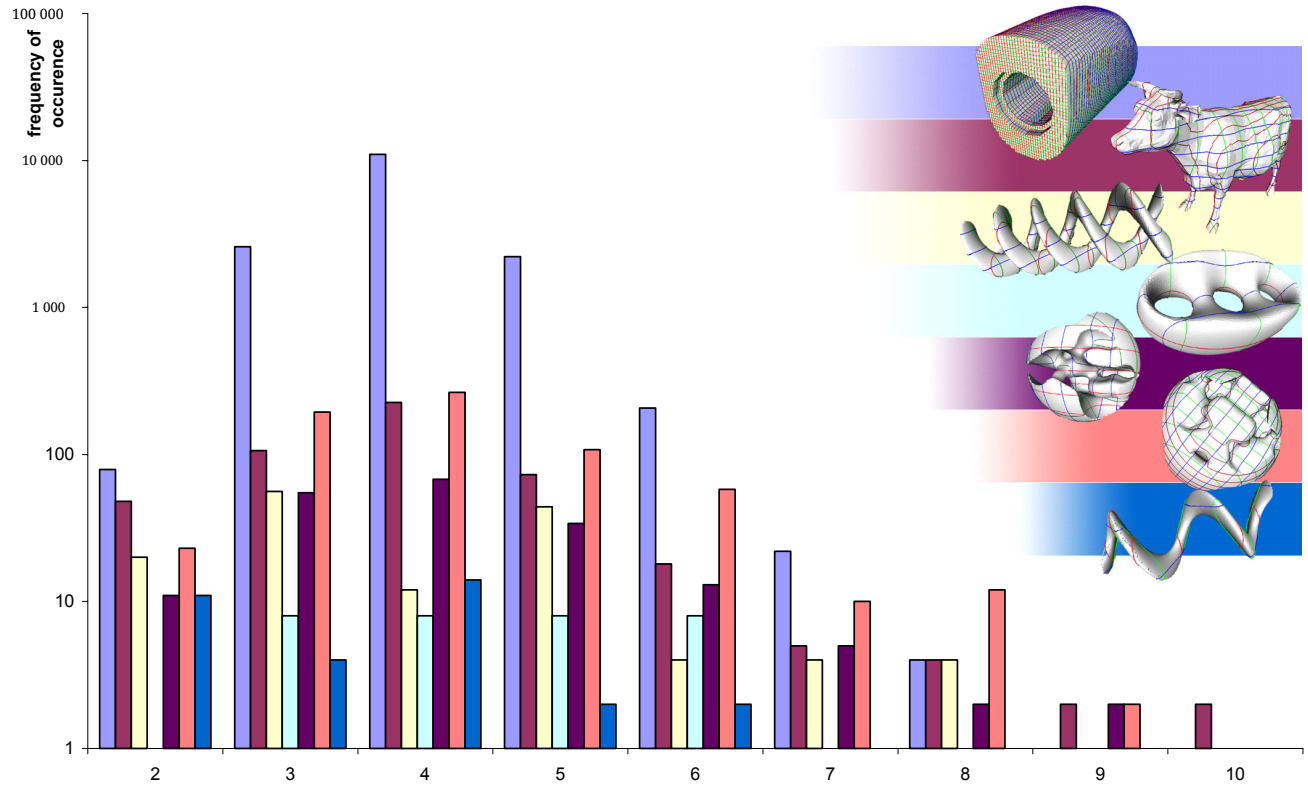

图8：多边形大小（边数）直方图。

格点阵列，其中包含单元，见图7。每个节点都是等高线与单元一侧的交点。由于等高线被假定为多边形的，节点只需通过求两条线段的交点即可计算。等高线经过单元角点的奇异情形将单独处理 [13]。

在第二步中，节点的构造完成。必须找到对应顶点，它既属于正交轮廓，也属于*M*的同一条边。如前所述，只需在*M*的相应边上查找等高线交点的辅助登记信息，即可快速完成此操作。将*M*的一条边上登记的、来自正交轮廓的每两个相邻交点视为对应顶点，它们共同构成一个节点。

4.3. 构造曲面

现在假设图*G*的顶点集由节点组成，其边表示两个节点顶点之间的轮廓部分。请注意，这些边的几何形状仍与相应的轮廓部分相对应。现在的任务是找出图 *G*中满足以下性质的环：其几何表示位于*M*的一个单元内。这些环表示位于曲面上的空间多边形。

我们假设*G*的每条边*e*都与单元B_1 和B_2, 相邻，见图6。集合{B_1, B_2}中的每个单元都包含一个我们感兴趣的环*c*，它与*e*相邻（这是基于二维流形对象的考量得出的）。环*c*表示所要查找的空间多边形。因此，对于每条*e* ，都必须查找两个环$_{e\ B}c_{\ 1}$和$_{e\ B}c_{\ 2}$，然后构造与这些环对应的多边形$_{1c}p$ 和$_{2c}p$ 。

获得所有多边形后，我们就可以开始拼接它们。可以使用任意的曲面片拼接技术。请注意，此类多边形的边数可能很多，但在我们的数据集中，边数为 2–10，见图8中的图。

所提出的方法首先在每个多边形的中心找到一个合适的点。然后利用中心点对每个多边形被划分为一组更易于修补的四边形，见图9。

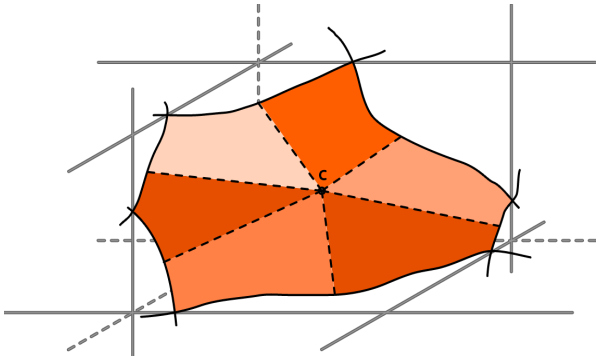

图9：将一般多边形划分为一组四边形。需要确定中心点*C*。

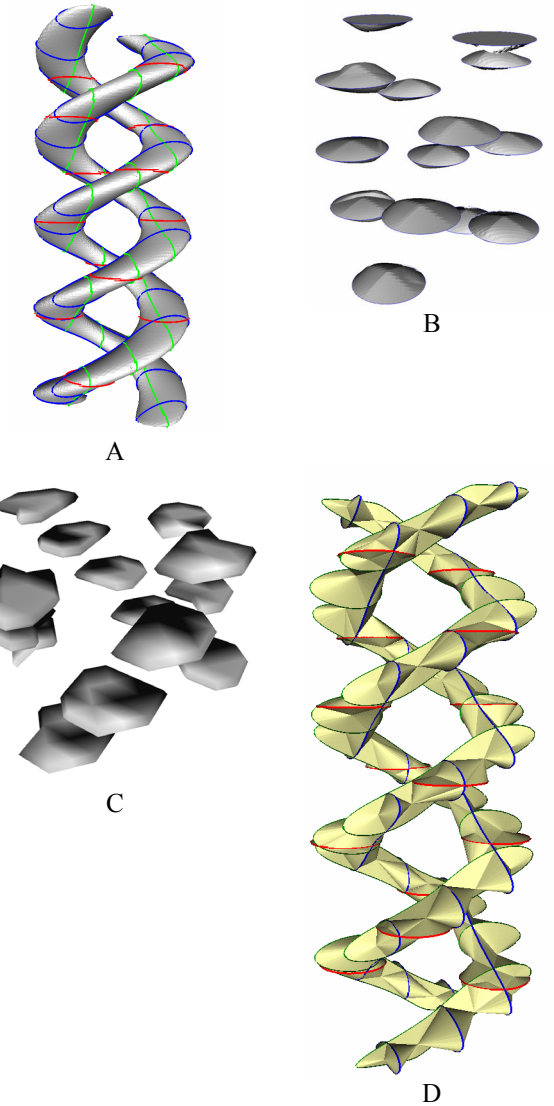

图 10：表面重建结果。A）输入数据集（由 Martin Čermák 提供），B）通过 VTK 切片类进行的表面重建，C）一种常见的基于体数据的方法，D）所提出的基于正交切片的表面重建方法。

5. 结果

第1节中提到的所有问题数据集以及更多数据集均已使用以下方法处理：

- 使用 VTK 中的切片类进行曲面重建；- 一种常见的基于体数据的方法；更多详情请参见 [5]；- 我们提出的基于正交切片的表面重建方法。

一个数据集的重建结果如图 10 所示，完整文档和实验结果请访问 http://herakles.zcu.cz/research/slices。

6. 结论与后续研究

我们目前的研究证明，正交切片在表面重建过程中具有显著优势。对于一类物体而言，正交切片几乎是正确重建它们的唯一方法。

所提出的方法假设对物体的采样足够充分，因此对应图*G*的连通分量数量等于原始曲面的不相连分支数量。

我们后续研究的重点是解决欠采样所引发的问题，即处理未能充分采样输入物体的数据集。此外，我们还希望研究轮廓不准确性对节点计算的影响。

参考文献

[1] Bresler, Y., Fessler, J.A., Macovski, A.：一种基于贝叶斯方法的多物体三维域不完整投影重建方法。IEEE《模式分析与机器智能汇刊》，11(8):840-858，1989年8月。

[2] Cong, G., Parvin, B.：基于轮廓的稳健高效曲面重建。The Visual Computer，(17):199-208，2001年

[3] Foley, J. D.、van Dam, A.、Feiner, S. K. 和 Hughes, J. F.，《计算机图形学：原理与实践》，Addison-Wesley，1990。[4] Jones, M., Chen, M.：一种利用轮廓数据构造曲面的新方法。Computer Graphics Forum (13): 75-84, 1994[5] Klein, R., Schilling, A.：利用轮廓快速距离插值以重建曲面。载于 Eurographics '99 会议论文集，短文与演示，1999年9月。[6] Meyers, D.：多分辨率镶嵌。载于

论文集，Graphics Interface '94，第25-32页，班夫，艾伯塔省，1994年5月。

[7] Meyers, D.：《平面轮廓的曲面重建》。博士论文，华盛顿大学，1994年。

[8] Shinagawa, Y., Kunii, T.L.：根据横截面自动构建Reeb图。IEEE计算机图形学与应用，11(6)：44-51，1991年11月。[9] Shinagawa, Y., Kunii, T.L., Kergosien, Y.L.：基于Morse理论的曲面编码。IEEE计算机图形学与应用，11(5)：66-78，1991年9月。[10] Skinner, S.M.：对应问题：从平行截面的轮廓重建物体。硕士论文，华盛顿大学计算机科学与工程系，1991年。[11] Soroka, B.I.：《从切片理解物体：从连续截面提取广义柱面描述》。博士论文，堪萨斯大学计算机科学系，1979年3月。TR-79-1。[12] Soroka, B.I.：从连续截面构造广义锥。计算机图形学与图像处理，(15)：54-166，1981年。[13] Svitak, R., Skala, V.：《基于正交切片的曲面重建》，ICCVG 2002，扎科帕内，波兰，2002年[14] Wood, Z. J.：《离散二维流形的计算拓扑算法》。加州理工学院，博士论文，2003年5月