

利用空间连续序列图像对物体的 形态与结构进行三维重建*

张立坚 曹有江

(中国科学院新疆物理所, 乌鲁木齐)

沈兰荪

(中国科学技术大学, 合肥)

摘要 本文从数据采样的原理出发, 提出一种利用空间连续序列图像对物体的外观形态与内部结构进行三维重建的方法。此法重建的结果是一个同时含有物体的外观形态和内部结构信息的实体。

关键词 数字图象处理; 空间图像; 三维重建

1. 前言

人们可以通过解剖(如连续切片)或非解剖(如 CT、NMR)等多种方式得到关于物体空间形态与结构的信息, 但遗憾的是这些信息被包含在某一断面图或表面的二维投影图中, 不能直接为人们所利用。六十年代末, 提出了利用空间连续序列图像进行物体三维重建的设想, 但直到 1977 年 Mazzotta 等报道了他们所研究的第一个实用系统^[1]。目前使用较多的 Keppel-Cook 和 S. Tamura 方法^[2], 可以由物体的轮廓线出发来进行外观形态的三维重建。但其结果仅仅是一个表示物体外观的“空壳”, 而内部的细节结构没有得到反映。E. Farrell 在 1985 年提出了一种所谓“栩栩如生”的三维重建方法^[3], 也只是将所得到的连续序列图像在采样间隔内进行简单重复, 以填充采样之间的空隙, 并没有提供出更多的信息。

2. 原理

本文工作的基础是依据了两个假设:

1. 三维物体是由一些各向同性的体素组成的。每个体素由位于该体素几何中心的一点来表示, 其大小等于该体素密度的平均值, 而体素各边的长度为一个计量单位。

2. 二维图像是由一些各向同性的像素组成的。每个像素由位于该像素几何中心的一点来表示, 其大小等于该像素密度的平均值, 而像素各边的长度为一个计量单位。图 1 示出体素与像素间的关系。

对于一个空间三维物体, 可以用密度变化函数 $f(x, y, z)$ (这通常是一个高幂次的非线性函数)来进行描述, 对这个物体的二维切片就是对上述密度变化函数的采样 $f(x,$

* 1988 年 7 月 9 日收到, 1990 年 3 月 6 日修改定稿。

y, z_0). 我们的问题是找到一种新的插值逼近方法仅以少量的已知数据来逼近高幂次的非线性函数 $f(x, y, z)$. 通过“体”插值, 而非前人对物体表面的“面”插值, 计算出在空间各点处物体的密度值, 以实现对该物体的三维外观形态和内部结构的重建.

3. 方法

欲逼近的原函数为

$$f(x) = f(x_0)(x/x_0)^{a(x)} \quad (1)$$

则有

$$a(x) = \lg [f(x)/f(x_0)] / \lg (x/x_0) \quad (2)$$

显然, $a(x)$ 的幂次比 $f(x)$ 的幂次要低

得多, 有时甚至可能是一个线性函数. 采用函数降阶逼近方法^[4], 可以在已知很少数据点的情况下, 通过对 $a(x)$ 的高精度逼近来达到对 $f(x)$ 的逼近.

对于多元高幂次函数, 可将其分解为变元可分离与变元不可分离两种不同情况进行讨论. 如果函数 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的各变元是可分离的, 则等式

$$W_k = W_{x_1 k} + W_{x_2 k} + \dots + W_{x_n k} - (N-1)W_0 \quad (3)$$

成立. 式中, W_k 是函数在第 k 点处的取值; W_0 是函数在第 0 点处的取值; $W_{x_i k}$ 是变元 x_i 取第 k 点, 而其它变元取第 0 点时函数的取值; N 是函数的变元个数.

如果采样得到的数值可以满足 (3) 式, 则认为要逼近的函数是一个变量可分离的函数, 反之则是变量不可分离的.

对于变元可分离函数:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left[\sum_{i=1}^N P(x_i) \right] - (N-1)W_0 + R_n(x) \quad (4)$$

式中, $P(x_i)$ 是当其它变元都取 0 点处的值时, 被分离出来的第 i 个变元 x_i 的逼近公式; $R_n(x) = \sum R_n(x_i)$ 是逼近函数的余项.

对于变元不可分离函数:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = P^0(x_1) + \sum_{i=2}^N \left\{ \frac{\delta(x_i)}{\sum_{j=2}^N \delta(x_j) h_{x_j}} \cdot [P^0(x_1) - P^1(x_1)](x_i - x_i^0) \right. \\ \left. + \frac{1}{2h_{x_i}} \frac{P'(x_1) - 2P^1(x_1) + P^2(x_1)}{P'(x_1) - 2P^1(x_1) + P^2(x_1)} \cdot (x_i - x_i^0)(x_i - x_i^1) \right\} + R_n(x) \quad (5)$$

式中, $P^j(x_i)$ ($j=0, 1, 2$) 的含义同前; $\delta(x_i)$ 是当其它点固定时, 从点 $(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ 到点 $(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n)$ 函数的增量; h_{x_i} 是变元 x_i 的采样步长; $R_n = \sum R_n(x_i)$ 是逼近函数的余项.

对于三维空间, 其三个坐标变量分别为 x_1, x_2, x_3 , 实际工作中通常将 z 坐标作为主变量 x_1 . 变元可分离函数的数值分布规律(判定规则)为

$$W_k = W_{x_1 k} + W_{x_2 k} + W_{x_3 k} - 2W_0 \quad (6)$$

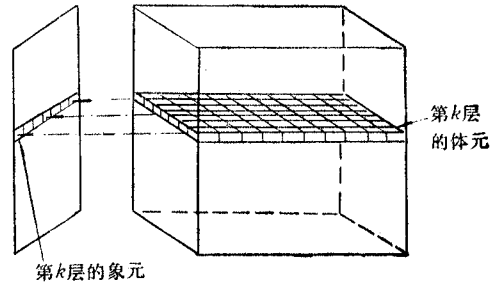


图1 体素与象素间的关系

可进一步导出变元可分离函数的逼近公式为

$$f(x_1, x_2, x_3) = P(x_1) + P(x_2) + P(x_3) - 2W_0 + R_n(x) \quad (7)$$

变元不可分离函数的逼近公式为

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, x_3) = & P(x_1) + \frac{\delta(x_2)}{\left[\sum_{i=2}^3 \delta(x_i) \right] h_{x_2}} \left\{ [P^0(x_1) - P^1(x_2)] \right. \\ & \times (x_2 - x_2^0) + \frac{1}{2h_{x_2}} [P^0(x_1) - 2P^1(x_1) + P^2(x_1)] \\ & \times (x_2 - x_2^0)(x_2 - x_2^1) \left. \right\} + \frac{\delta(x_3)}{\left[\sum_{i=2}^3 \delta(x_i) \right] h_{x_3}} \\ & \times \left\{ [P^0(x_1) - P^1(x_1)](x_3 - x_3^0) + \frac{1}{2h_{x_3}} \cdot [P^0(x_1) - 2P^1(x_1) \right. \\ & \left. + P^2(x_1)](x_3 - x_3^0)(x_3 - x_3^1) \right\} + R_n(x) \quad (8) \end{aligned}$$

4. 实验结果

我们在 ARISE-II 图像处理系统中建立了一个 3DRS (3-D Reconstruction System) 系统, 以实现相应算法的计算机模拟。

图 2 是对六面体进行重建所得到的结果。图 3 是利用软解剖功能将该六面体挖去一角后的结果。

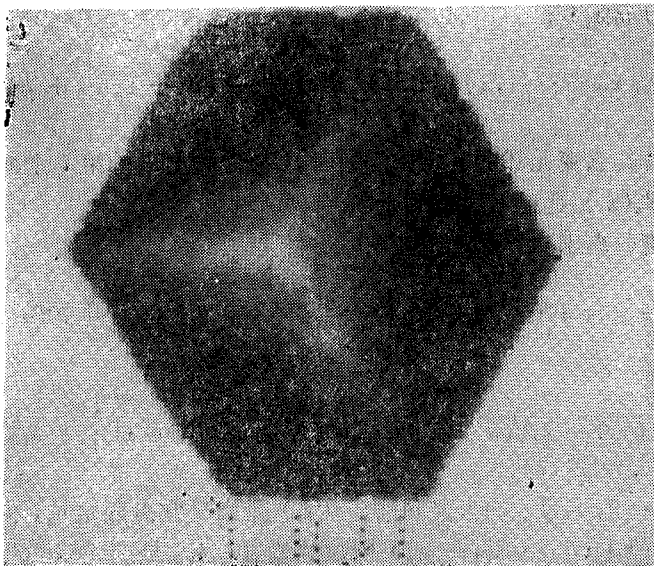


图 2 正六面体的重建结果

作为本系统应用的一个实例, 我们对由新疆化学所首次发现的新疆蝗虫痘病毒包含体的空间立体组织结构进行了三维重建, 并取得了较为满意的结果(见图 4、图 5)。

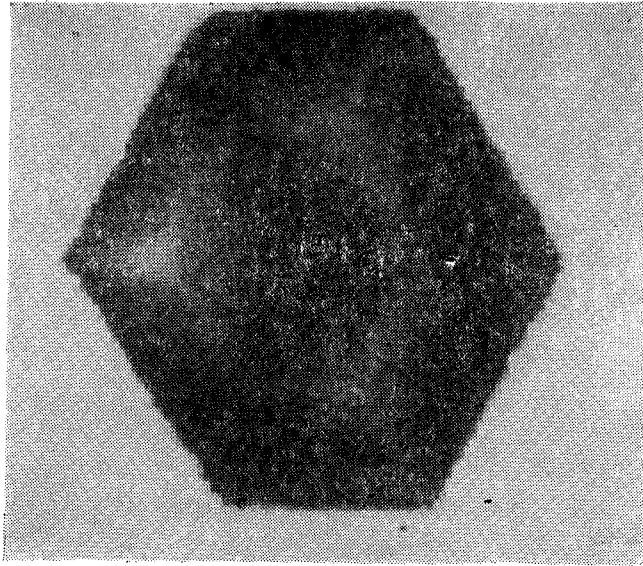


图3 正六面体被挖去一角后的重建结果

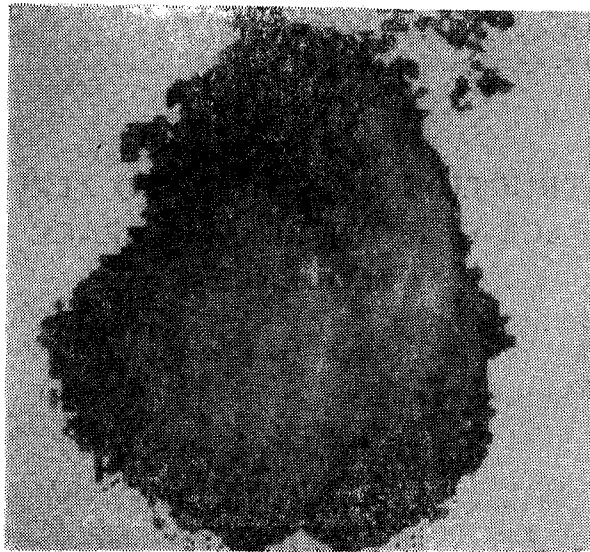


图4 新疆蝗虫痘病毒包含体的重建结果(1)

5. 讨论

本文所进行的重建是对空间物体的各点进行的“体”重建，而不是仅对物体表面进行的“面”重建，所以不论是多么复杂的形态及结构都可以只经过一次重建处理而得到所需要的最后结果。而不要求预先分解为一些简单的形态与结构。

本方法的另一个显著的特点是它所需要的已知数据点可以很少，在极限情况下对于有 N 个变元的原函数只需要有 3^N 个已知数据点就可以实现相应的逼近。当有更多的已知数据点时则可将逼近的精度进一步提高。

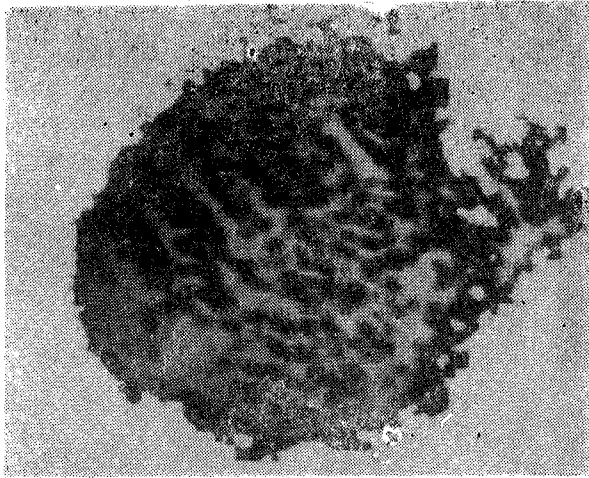


图5 新疆蝗虫痘病毒包含体的重建结果(2)

参 考 文 献

- [1] J. C. Mazzotta, B. L. Mamilton, *Computer in Biology and Medicine*, 7 (1977), 265—279.
- [2] E. Keppel, *IBM Jour. of Research and Development*, 19 (1975), 2--11.
- [3] E. J. Farrell, *IEEE Computer Graphics and Application*, 5 (1985) 12, 34—41.
- [4] 赵元民, 函数逼近方法, 黑龙江科学出版社, 1981年.

3-D RECONSTRUCTION OF SHAPE AND STRUCTURE FOR THE SPACE OBJECT FROM ITS SPACE IMAGE SEQUENCE

Zhang Lijian Cao Youjiang

(*Xinjiang Institute of Physics, Academia Sinica, Wulumugi*)

Shen Lansun

(*University of Science and Technology of China, Hefei*)

Abstract A new method of 3-D reconstruction of space object from its space continual series images is introduced based on the principle of sampling. Compared with old methods, this method has many advantages such as higher precision and fewer requested known points. The result of reconstruction with this method is an entity which involves the exterior shape and interior construction information of the object simultaneously.

Key words Digital image processing; Space image; 3-D reconstruction