

文章编号:1001-9081(2009)01-0074-04

一种基于网格的从明暗恢复形状方法

田 丰,高 骞,郭 巍,仇庆丰,王传云

(沈阳航空工业学院 计算机学院, 沈阳 110136)

(gaoqian506@163.com)

摘 要:针对目前“从明暗恢复形状”时存在计算复杂及收敛性差等问题,提出一种基于网格的解决方法。首先通过图像预处理及区域划分操作将原始图像分割成多个亮度离散的多边形区域,并逐步转换成平面三角形网格,然后根据 Lambert 定律建立关于空间网格顶点坐标的方程组,在使用最小二乘法求解后,直接将结果应用到 OpenGL 或 DirectX 等实时渲染引擎的图形管道中,实现模型的建立与显示。经仿真实验证明该方法计算方便,可逼真重建原始物体的形状。

关键词:从明暗恢复形状;网格重建;图像处理;Lambert 定律;最小二乘法

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Method for shape from shading based on mesh

TIAN Feng, GAO Qian, GUO Wei, QIU Qing-feng, WANG Chuang-yun

(College of Computer Science, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang Liaoning 110136, China)

Abstract: Concerning the current problems of high computation cost and poor convergence performance during Shape From Shading (SFS), a mesh-based resolution was proposed. The original image was divided into several regions by the means of image preprocessing and region segmentation and were transformed them into triangular mesh. And then equations with regard to each vertex of the mesh in three-dimensional space were established. Finally the result resolved from equations was straightly applied to the graphic pipeline of real-time three-dimensional render engine such as OpenGL or DirectX to accomplish the model reconstruction and rendering. The results of simulation show that the method is of convenient calculation and can reconstruct the original model realistically.

Key words: Shape Form Shading (SFS); mesh reconstruction; image processing; lambert law; least square

0 引言

从图像灰度明暗变化恢复物体形状 (Shape From Shading, SFS) 是计算机视觉中三维物体形状重建的重要研究内容之一,最先在 20 世纪 70 年代由文献[1]提出并得以发展。这种方法根据一个确定的反射模型建立物体表面形状与图像亮度之间的约束关系,然后对此约束关系联立解出物体表面的三维形状。

经过几十年的发展,其他学者在文献[1]的基础上提出了多种 SFS 方法,文献[2]提出了启发式方法,文献[3]利用先验知识库提高算法鲁棒性和正确性,文献[4]利用人工参与的方法避免凹凸二义性问题,文献[5-6]在光照模型中考虑距离衰减因素,进一步接近现实中的情况,文献[7]提出一种基于混合模型的 SFS 有限元方法,文献[8]分析了几种典型的 SFS 算法。

上述这些方法大多是以偏微分方程 (Partial Differential Equation, PDE) 数学模型为基础,而在 PDE 求解时存在其本身固有的困难:求解时要求有合适的边界条件,否则存在解的唯一性问题;非线性 PDE 的线性化误差;一般迭代计算的收敛性和计算复杂度等^[9]。针对以上问题,考虑离散建模时问题线性化,硬件便于实现等优点,本文提出一种基于网格的从

明暗恢复物体形状方法。该方法首先通过灰度化、去除噪声、边缘检测、边缘扩展、区域识别、平面顶点确定等步骤提取原始图像中的平面多边形网格信息,利用一种称为三角形网格原子的拓扑结构解释和构造该网格,以离散的网格顶点及表面亮度信息建立约束关系,实现物体模型的重建。

1 三角形网格原子及其重建

所谓三角形网格原子就是二维网格中的一个基本形状,由 3 个三角形邻接而成,共有 4 个顶点,其中心顶点为 3 个三角形所共用,其余 3 个顶点为 2 个三角形共用,组成一个更大的三角形,如图 1 所示。

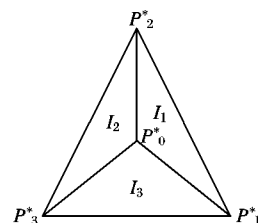


图 1 三角形网格原子

图 1 中 $P_i^* (i = 0, 1, 2, 3)$ 为三角形网格的顶点,它们之间的连线组成 3 个三角形。 $I_k \in \mathbf{R} (k = 1, 2, 3)$, 分别为这 3 个

收稿日期:2008-07-07;修回日期:2008-10-08。

作者简介: 田丰 (1958-), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士, CCF 高级会员, 主要研究方向: 模式识别、计算机测控、无线传感器网络; 高骞 (1979-), 男, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 模式识别、图像处理; 郭巍 (1981-), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线多媒体传感器网络; 仇庆丰 (1980-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线传感器网络; 王传云 (1984-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线传感器网络、嵌入式系统。

三角形的亮度,该值由三角形平面上各像素点的亮度值拟合而成,可运用均值、中值、最小均方误差^[10]等方法进行计算。

在摄像机坐标系下,网格顶点 P_i^* 所对应的近平面投影点 P'_i 为:

$$P'_i = R^{-1}V^{-1}P_i^* \quad (1)$$

其中: R 为摄影矩阵,由摄像机视角(viewangle),高宽比(aspect),近平面距离(N),远平面距离(F)确定,归一化视截体的空间范围;而 V 为视口矩阵,由输出图像的高度(height)和宽度(width)确定。那么 P'_i 所对应的三维网格顶点坐标 P_i 为:

$$P_i = t_i P'_i \quad (2)$$

其中: t 为待定系数,只要求得 t 值即可确定物点 P 的空间坐标。在运用 Lambert 定律时,物体表面的法向量是一个至关重要的因素,在已知空间网格各顶点坐标的情况下,根据向量叉积的性质,可求出空间中各三角形的单位法向量:

$$\begin{cases} \overline{m_1} = \frac{(P_1 - P_0) \times (P_2 - P_0)}{|(P_1 - P_0) \times (P_2 - P_0)|} \\ \overline{m_2} = \frac{(P_2 - P_0) \times (P_3 - P_0)}{|(P_2 - P_0) \times (P_3 - P_0)|} \\ \overline{m_3} = \frac{(P_3 - P_0) \times (P_1 - P_0)}{|(P_3 - P_0) \times (P_1 - P_0)|} \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)代入到上式中并经过等价变换得到空间三角形单位法向量与近平面投影点的关系式:

$$\begin{cases} \overline{m_1} = \frac{t_1 t_2 (P'_1 - P'_2) + t_0 t_1 (P'_0 - P'_1) - t_0 t_2 (P'_0 - P'_2)}{|t_1 t_2 (P'_1 - P'_2) + t_0 t_1 (P'_0 - P'_1) - t_0 t_2 (P'_0 - P'_2)|} \\ \overline{m_2} = \frac{t_2 t_3 (P'_2 - P'_3) + t_0 t_2 (P'_0 - P'_2) - t_0 t_3 (P'_0 - P'_3)}{|t_2 t_3 (P'_2 - P'_3) + t_0 t_2 (P'_0 - P'_2) - t_0 t_3 (P'_0 - P'_3)|} \\ \overline{m_3} = \frac{t_3 t_1 (P'_3 - P'_1) + t_0 t_3 (P'_0 - P'_3) - t_0 t_1 (P'_0 - P'_1)}{|t_3 t_1 (P'_3 - P'_1) + t_0 t_3 (P'_0 - P'_3) - t_0 t_1 (P'_0 - P'_1)|} \end{cases} \quad (4)$$

这时根据 Lambert 定律,列出关于物体表面亮度的方程组:

$$\begin{cases} I_1 = (\overline{m_1} \times \vec{s}) I_d \rho_d \\ I_2 = (\overline{m_2} \times \vec{s}) I_d \rho_d \\ I_3 = (\overline{m_3} \times \vec{s}) I_d \rho_d \end{cases} \quad (5)$$

其中: I_d, ρ_d 分别为光源亮度与物体表面漫反射系数,若令

$$I(t_i, t_j, t_k) = \left(\frac{t_j t_k (P'_j - P'_k) + t_i t_j (P'_i - P'_j) - t_i t_k (P'_i - P'_k)}{|t_j t_k (P'_j - P'_k) + t_i t_j (P'_i - P'_j) - t_i t_k (P'_i - P'_k)|} \times \vec{s} \right) I_d \rho_d \quad (6)$$

则式(5)可写成:

$$\begin{cases} I_1 = I(t_0, t_1, t_2) \\ I_2 = I(t_0, t_2, t_3) \\ I_3 = I(t_0, t_3, t_1) \end{cases} \quad (7)$$

在已知目标距离的情况下可消去一个未知数 t_0 ,即使在未知目标距离时亦可简单地指定一个估计距离 $d \in (N, F)$,这并不会影响各顶点之间的相对位置关系。最后利用非线性最小二乘估计法^[11]求出 t_1, t_2, t_3 的数值解,代入式(2)中即可得到空间顶点 P_0, P_1, P_2, P_3 的三维坐标。

如果再向三角形网格原子中以 P_0^* 为中心添加多个三角形,同样可以根据以上分析列出方程组并最终求解:

$$\begin{cases} I_1 = I(t_0, t_1, t_2) \\ \vdots \\ I_k = I(t_0, t_k, t_{k+1}) \\ \vdots \\ I_n = I(t_0, t_n, t_1) \end{cases} \quad (8)$$

至此便完成了在环境参数已知的情况下,从二维三角形网格原子到空间三角棱锥的映射。前面已经提到,任意多边形网格都可以变换成三角形网格原子的形式并加以求解,接下来分析它的变换方法。

2 扩展到一般多边形网格

简单的三角形网格原子的三维重建没有任何实际意义,因为现实生活中遇到的物体形状种类繁多,不胜枚举,有曲面的也有平面的,但都可以用多边形网格表示,许多游戏和三维影视动画中便采用这种建模方法,并得到了逼真的渲染效果,所以能够从任何多边形网格变换到三角形网格原子形式并加以求解是本算法的意义所在。

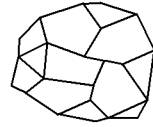


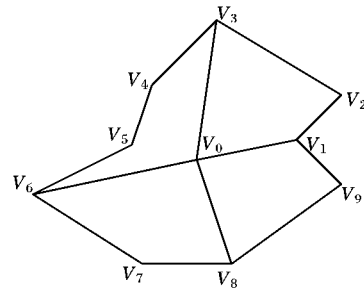
图2 一般多边形网格示例

一般多边形网格的特点是由多边形(而不是三角形)区域组成,并且内含多个中心顶点,图2显示了一个典型的多边形网格示例。

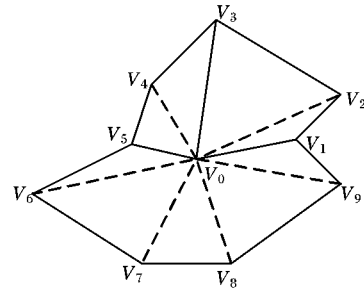
针对以上两个特点,我们也将一般多边形网格到三角形网格原子的变换分为两个步骤:多边形网格原子变换和一般网格变换。

2.1 多边形网格原子变换

多边形网格原子是由多个多边形围绕在一个中心顶点周围而形成。图3(a)所示的多边形网格原子由4个多边形组成,中心顶点为 V_0 。第1个多边形边缘顶点序列为 V_1, V_2, V_3 ;第2个多边形边缘顶点序列为 V_3, V_4, V_5 ;第3个多边形边缘顶点序列为 V_5, V_6, V_7 ;第4个多边形边缘顶点序列为 V_7, V_8, V_9 。



(a)原始网格



(b)变换后网络

图3 多边形网格原子

假设多边形原子由 m 个多边形区域, $n+1$ 个顶点组成,第 $k(k=1, 2, \dots, m)$ 个多边形按逆时针方向的起始边缘顶点

编号为 s_k , 例如在图 3 中的多边形网格原子各多边形起始顶点编号 s_1, s_2, s_3, s_4 分别等于 1, 3, 6, 8。那么只需添加中心顶点到未连接顶点的连线即可轻易地将多边形风格原子变换到三角形网格原子的表达形式, 完成了扩展的第一个步骤, 图 3(b) 显示了对图 3(a) 所示的图形的三角形网格原子变换结果。可以直接使用式(8)求解各顶点的三维空间坐标。下面给出了多边形网格原子中各顶点所对应的空间坐标的求解方程组:

$$\begin{cases} I_1 = I(t_0, t_1, t_2) \\ \vdots \\ I_k = I(t_0, t_{s_k}, t_{s_k+1}) \\ \vdots \\ I_k = I(t_0, t_{s_{k+1}-1}, t_{s_{k+1}}) \\ \vdots \\ I_m = I(t_0, t_{s_m}, t_1) \end{cases} \quad (9)$$

式(9) 中包含了 n 个方程, 在已估计网格与摄像机距离时情况下可唯一地确定各顶点三维空间中的坐标值。至此完成了多边形网格原子到三角形原子的变换, 接下来讨论从一般多边形网格到多边形网格原子的变换。

2.2 扩展到一般多边形网格

一般多边形网格与多边形原子的区别是它具有多个中心顶点, 如图 4(a) 所示, 我们可以像上一节分析的那样从每个中心顶点出发, 连接所有相邻区域的顶点, 将一般多边形网格变化成多个三角形网格原子的组合, 如图 4(b) 所示。虽然该方法可以建立超定方程组, 但对于一个多边形区域重复划分多次是没有必要的, 并且会增加计算的时间和空间复杂度。因为我们只关心多边形区域的顶点位置及法线方向, 所以只要对每个多边形区域的三角形划分一次, 如图 4(c) 所示, 便可将一般多边形网格变换到多边形网格原子的形式。

比较图 4(b) 和图 4(c), 可以明显地看出后一种方法显著降低了三角形数目(即重建方程组的维度), 提高重建效率, 以下给出一般多边形网格的计算方法。

假设某一多边形网格由 m 个多边形组成, 第 $k(k = 1, 2, \dots, m)$ 个多边形有 w_k 个顶点(包含中心顶点与边缘顶点), 分别为 $P_{k,1}, P_{k,2}, \dots, P_{k,w_k}$, 其表面亮度为 I_k , 由此而建立一个关于各顶点空间坐标的超定方程组为:

$$\begin{cases} I_1 = I(t_{1,1}, t_{1,2}, t_{1,3}) \\ I_1 = I(t_{1,1}, t_{1,3}, t_{1,4}) \\ \vdots \\ I_1 = I(t_{1,1}, t_{1,w_1-1}, t_{1,w_1}) \\ \vdots \\ I_k = I(t_{k,1}, t_{k,2}, t_{k,3}) \\ I_k = I(t_{k,1}, t_{k,3}, t_{k,4}) \\ \vdots \\ I_k = I(t_{k,1}, t_{k,w_k-1}, t_{k,w_k}) \\ \vdots \\ I_m = I(t_{m,1}, t_{m,2}, t_{m,3}) \\ I_m = I(t_{m,1}, t_{m,3}, t_{m,4}) \\ \vdots \\ I_m = I(t_{m,1}, t_{m,w_m-1}, t_{m,w_m}) \end{cases} \quad (10)$$

最后利用非线性最小二乘估计^[11] 法求解三维空间中各顶点坐标, 实现二维网格到三维网格的映射。

在应用本算法之前还必须提取出图像中的二维网格信息, 这主要通过两个阶段来实现: 图像预处理阶段和区域划分阶段。图像预处理阶段由灰度化、去噪、边缘检测和边缘扩展组成, 而区域划分阶段由区域识别和顶点确定二个步骤组成。其中大多选用数字图像处理中经典算法, 在此不再叙述。

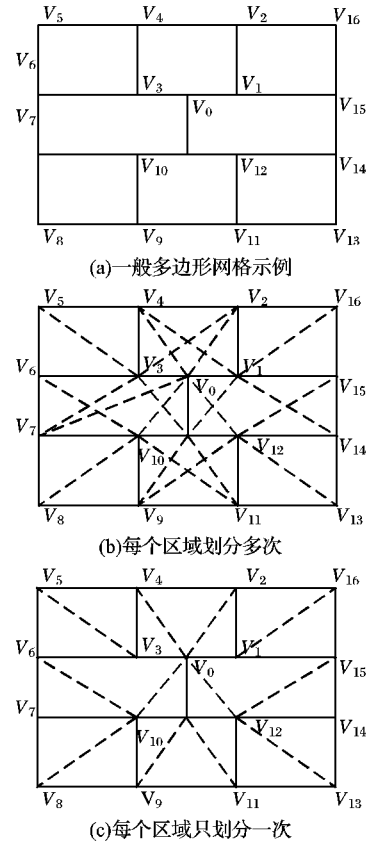


图 4 一般多边形网格变换方法

3 仿真实验

以下展示了对于三角形网格原子图像和一般多边形网格图像的重建结果。这两幅图像皆由 3DS-MAX 标准渲染器生成。经本算法重建后的三维网格无论从三维空间还是从二维平面的角度衡量都逼真地重现了原始模型表面的形状。

在对三角形网格原子重建时, 采用的原始图像如图 5(a) 所示, 待重建物体为一个三角棱锥, 具体环境参数如表 1 所示, 重建过程如图 5 所示。

表 1 网格重建的设置参数

类别(class)	参数(parameters)	值(value)
灯光(light)	光源方向(s)	(0.3162, 0.7589, 0.5692)
	光源亮度(power)	255
目标(object)	物体漫反射系数(diffuse)	0.8325
	摄像机近平面(N)	0.1
摄像机(camera)	摄像机远平面(F)	1000
	视角(degree)	34.314
	高宽比(aspect)	1.33
输出图像(output image)	输出图像宽度(width)	640
	输出图像高度(height)	480

表 2 列出原始模型与重建结果网格的比较, 三维距离是指原始顶点与相应的重建顶点的欧氏距离, 二维距离是以像素为单位的原始像点与对应的重建网格像点的欧氏距离。从该表中可以看出重建后网格与原始形状相对于摄像机是平行

的,这只影响了重建结果的大小而没有改变它的形状。

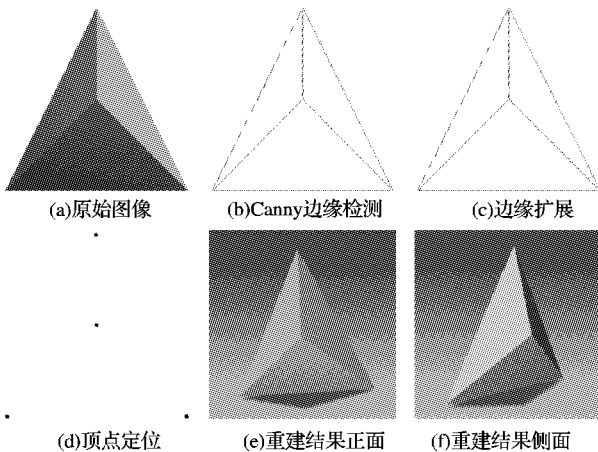


图 5 三角形网格原子重建过程

表 2 三角形网格的重建结果与原始数据比较

顶点	P_0	P_1	P_2	P_3
原始值	(-10, -10, 40)	(0, 10, 40)	(0, 0, 35)	(10, -10, 40)
重建值	(-7.2119, -7.4453, 29.71)	(-0.032114, 7.6302, 31.09)	(0.027683, -0.027752, 26.8)	(7.4527, -7.5656, 30.315)
三维距离	10.9629	9.2198	8.2001	10.3060
二维距离	5.493	3.297	2.284	2.192

注:二维距离标准差为 3.573。

对于一般多边形网格的重建环境参数设置与表 2 所示相同,重建过程如图 6 所示。由于存在遮挡的图像会使重建时产生二义性,因此该一般多边形网格的原始模型采用了去掉壶嘴与壶把的茶壶。在顶点定位时由于边缘扩展的随机性导致了网格中顶点过于分散的情形,如图 6(d)所示,消除这种情况的方法很简单,只要在区域划分阶段加入二值形态学中的膨胀和收缩操作即可,如图 6(e)、6(f)所示。由于该网格的顶点众多,没有一一列出比较,但重建结果已经证实了该算法的准确性。

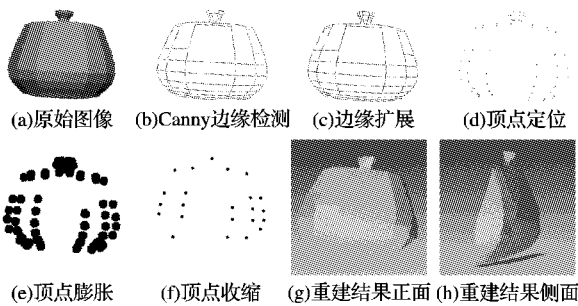


图 6 一般多边形网格重建过程

4 结语

本文提出了一种基于网格的从明暗恢复形状(SFS)方法,该方法避免了求解偏微分方程(PDE)时计算复杂度高、需要合适边界条件、无法处理非平滑表面等问题,而利用三角形网格逼近现实中物体形状,以离散的方式建立物体表面亮度与形状的约束关系,重建结果可直接应用到 OpenGL 或 DirectX 等实时渲染引擎的图形管道中进行显示。同时本方法存在以下不足,需要在将来的工作中加以改进:

1)在数学模型中未考虑表面凹凸二义性问题,应加入额外的条件消除这种情况;

2)只适用于朗勃(Lambertian)表面的物体形状重建,而现实环境中的物体表面亮度是受到漫反射、高光反射、纹理等多重光照因素影响。

参考文献:

- [1] HORN B K P. Height and gradient from shading[J]. International journal of Computer Vision, 1990, 5(1): 37-75.
- [2] VEGA O E, YANG Y H. Shading logic: A heuristic approach to recover shape from shading[J]. IEEE Transaction of pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(6): 592-597.
- [3] HUANG X Y, GAO J Z, WANG L, *et al.* Exemplar-based shape from shading [C] // IEEE Sixth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. Montréal: IEEE Press, 2007: 349-356.
- [4] ZENG G, YASUYUKI M, QUAN L, *et al.* Interactive shape from shading[C] // Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego: IEEE Press, 2005: 343-350.
- [5] PRADOS E, FAUGERAS O. Shape from shading: a well-posed problem[C] // International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego: IEEE Press, 2005: 870-877.
- [6] ABDELREHIM H A, FARAG A A. A New Formulation for Shape from Shading for Non-Lambertian Surface[C] // Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New York: IEEE Press, 2006: 1817-1824.
- [7] 杨磊, 韩九强, 刘新航. 基于混合反射模型的 SFS 有限元方法的研究[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(32): 51-54.
- [8] 廖熠, 赵荣椿. 从明暗恢复形状(SFS)的几类典型算法分析与评价[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(10): 954-961.
- [9] KARACALI B, SNYDER W. Noise reduction in surface reconstruction from a given gradient field[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(1): 25-44.
- [10] ENG H L, MA K K. Noise adaptive soft-switching median filter[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2): 242-251.
- [11] KINCAID D, CHENEY W. Numerical analysis: mathematics of scientific computing[M]. 3rd ed. London: Thomson Learning, 2002: 73-93.

(上接第 59 页)

- [7] PAN W M, BUI T D, SUEN C Y. Text segmentation from complex background using sparse representations [C]// Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition. Curitiba, Brazil: IEEE Press, 2007.
- [8] CHADDHA N, GUPTA A. Text segmentation using linear transforms [C]// Proceedings of ASILOMAR-29. Pacific Grove, CA, USA: IEEE Press, 1996.
- [9] DONOHO D, HUO X. Uncertainty principles and ideal atomic decomposition [J]. IEEE transactions on information theory, 1999, 47(7): 2845-2862.

- [10] OTSU N. A threshold selection method from gray level histograms [J]. IEEE transactions on systems, man and cybernetics, 1979(1): 62-66.
- [11] YE Q, GAO W, HUANG Q. Automatic text segmentation from complex background [C]// IEEE International Conference on Image Processing. Singapore: IEEE Press, 2004, 5: 2905-2908.
- [12] CHADDHA N. Text segmentation in mixed mode images [C]// 28th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, CA, USA: IEEE Press, 1994.
- [13] YUAN FENG. Windows 图形编程[J]. 英宇工作室, 译. 北京: 机械工业出版社, 2002: 269-271.