

环形物体的两步纹理映射算法

江巨浪^{1),2)} 张佑生²⁾ 薛峰²⁾ 胡敏²⁾

¹⁾(安庆师范学院物理与电气工程学院, 安庆 246011) ²⁾(合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009)

摘要 鉴于现有的两步纹理映射技术对环形物体表面的纹理映射均不适用,为此提出了一种两步纹理映射方法,用于解决环形物体的纹理映射问题。该算法选择圆环表面为中介曲面,首先运用面积等比约束方法将两块相同类型的纹理分别映射到圆环的上下两侧表面,并通过对纹理拼接区域进行插值预处理来消除纹理接缝;然后采用中介表面法向法将圆环表面的纹理进一步映射至物体表面。实验结果表明,该算法可将平面纹理映射至多种环形物体表面,不仅纹理形变小,且保持连续,能够较好地满足虚拟现实与真实感绘制对环形物体表面的纹理映射要求。

关键词 纹理映射 两步纹理映射 环形物体 圆环表面 纹理变形 纹理连续

中图法分类号:TP391.41 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)04-0774-06

Texture Mapping Algorithm for Annular Objects

JIANG Ju-lang^{1),2)}, ZHANG You-sheng²⁾, XUE Feng²⁾, HU Min²⁾

¹⁾(School of Physics and Electrical Engineering, Anqing Teachers College, Anqing 246011)

²⁾(School of Computer Science and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract As the previous two-step texture mapping algorithm does not suit the annular objects, a texture mapping algorithm for the annular objects is proposed. The torus is chosen as the media-surface, whose upside and underside are mapped respectively with two pairs of the same style textures applying restraint of equal ratio of areas. The two textures are stitched on the torus using the interpolation technique to avoid the joint. Finally, the media-surface normal method is adapted to map the texture from the torus to the object's surfaces. The experimental results show that the algorithm can be used to map the texture from the plane to most of the Annular Object's surfaces, on which the rendered texture has little distortion and looks continuous. The proposed method can be used in realistic rendering or VR system to map texture onto the surfaces of annular objects.

Keywords texture mapping, two-step texture mapping, annular objects, torus, texture distortion

1 引言

由于纹理映射技术可用于绘制物体表面的纹理细节,现已在虚拟现实和计算机真实感图形绘制中得到广泛的应用。Catmull首次提出纹理映射方法,并实现了参数曲面上的纹理映射^[1]。考虑到实际应用中多数物体是用非参数化的表面模型来表示,为实现对其表面的纹理进行映射,Bier和Sloan提出

两步纹理映射方法^[2]。这种方法是根据实际物体的具体形状,通过选择一种中介曲面,将映射过程分为S映射和O映射两步进行,并具有便捷与快速的特点。其中,S映射完成从纹理空间到中介空间的变换;而O映射则进一步完成从中介空间到景物空间的变换。已有的两步纹理映射方法所采用的中介曲面有平面、球面、圆柱面和立方体面4种,虽然该方法适用于大多数物体的纹理映射,但当用于环形物体时,则会产生严重的纹理形变。尽管人们以减

基金项目:国家自然科学基金项目(60575023);安徽省高校省级自然科学研究重点项目(KJ2007A122ZC)

收稿日期:2006-09-07;改回日期:2007-05-21

第一作者简介:江巨浪(1967~),男,副教授。2006年于合肥工业大学获计算机应用技术专业博士学位。主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实与图像处理。发表学术论文20余篇。E-mail:jiangjulang@126.com

少纹理变形为目标,提出了多种纹理映射的改进算法^[3,4],但尚未见到有人针对环形物体提出相应的纹理映射方法。近年来,纹理合成方法得到了快速发展^[5,6],虽已有不少方法可用于任意表面的纹理生成,但到目前为止,其合成速度与实时要求仍有一定差距,不仅表面网格需要特殊处理,并且不同类型纹理的合成质量存在差异。

由于环形的物体在实际中经常遇到,因此其表面纹理绘制方法的研究值得关注。本文沿用传统的两步纹理映射思路,选择圆环表面作为中介曲面,并提出相应的S映射与O映射算法,不但实现了对环形物体的纹理映射,而且取得了较为满意的效果。

2 S映射算法

圆环可视为由母线圆绕其所在平面上的一条轴线回转一周而成(见图1(a))。母线圆圆心 $\hat{O}$ 的回转轨迹称为导圆,导圆平面将圆环划分为上下两半,该两半使用两种不同颜色(图上显示不同灰度)加以区分(图1(b))。为了完成对整个圆环表面的纹理映射,可使用两块相同类型的纹理,以相同的映射算法将它们分别映射到圆环的上下表面,并采用插值技术消除上、下表面纹理拼接所产生的接缝。

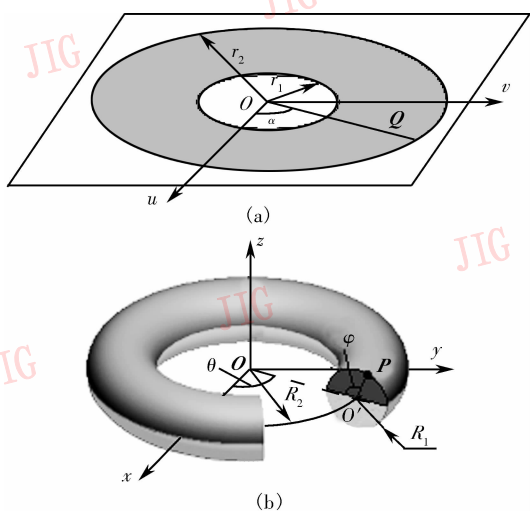


图1 面积等比约束的S映射算法

Fig. 1 S mapping using restraint of equal ratio of areas

2.1 面积等比约束的S映射算法

对于从纹理平面到圆环表面的S映射,由于要求纹理变形尽量小,且由于是使用两块相同类型的纹理分别对圆环上、下表面进行映射,故还要求在

上、下表面的接合处不产生明显的接缝。对于前一要求,可采用面积等比约束方法^[7]来满足;对于后一要求,则可采用插值方法来实现(下一节讨论)。

首先按以下步骤设置S映射算法的实现环境(如图1所示):(1)将作为中介面的圆环置于3维坐标系 $Oxyz$ 中,并使其轴线与 z 轴重合,而使其导圆圆心与该坐标系原点 $\hat{O}$ 重合;设母线圆半径为 R_1 ,导圆半径为 R_2 ;(2)在纹理平面上设置2维坐标系 ouv ,并在其上取一个内外半径分别为 r_1 与 r_2 的环形区域图1(a),用于对圆环上半表面进行纹理映射;(3)取一与 x 轴的夹角为 θ 的母线圆,其上半圆周上一点 $P = (x, y, z)$ 的对应圆周角为 φ (图1(b)),在纹理环形区域取一与 u 轴的夹角为 α 的径向线段,其上一一点 $Q = (u, v)$ 处的半径为 r (图1(a))。

由于纹理平面上环形区域的内外边界线可分别映射为圆环中介面上的内外侧圆周线,因此为使映射的纹理变形小,本文规定内外边界线长度之比在映射前后保持不变,即 $r_1/r_2 = (R_2 - R_1)/(R_2 + R_1)$ 。同时还规定映射前后的纹理面积之比为1,即 $\pi(r_2^2 - r_1^2) = 2\pi^2 R_1 R_2$,由此确定平面环形区域的内外半径如下:

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{\frac{\pi}{2}}(R_2 - R_1) \\ r_2 = \sqrt{\frac{\pi}{2}}(R_2 + R_1) \end{cases} \quad (1)$$

接下来进一步推导圆环的上点 P 与纹理平面上点 Q 之间的映射关系,首先令

$$\alpha = \theta \quad (2)$$

上式确定了点 P 所在的母线圆与点 Q 所在径向线段间的对应关系。通常可使纹理映射沿半径方向由内向外逐步展开,同时在该映射过程中,令纹理平面上半径在 r_1 与 r 之间区域的面积与上半圆环表面上母线圆周角在0到 φ 之间区域的面积之比恒等于1,即

$$\pi(r^2 - r_1^2) = \int_0^\varphi 2\pi(R_2 - R_1 \cos\varphi) R_1 d\varphi$$

由上式与式(1)可得

$$r = \sqrt{\frac{\pi}{2}(R_2 - R_1)^2 + 2R_2 R_1 \varphi - 2R_1^2 \sin\varphi} \quad (3)$$

其中, $\varphi = \cos^{-1} \frac{R_2 - \sqrt{x^2 + y^2}}{R_1}$

式(2)与式(3)确定了点 P 与点 Q 之间的如下

映射关系：

$$\begin{cases} u = r\cos\alpha = r\cos\theta \\ v = r\sin\alpha = r\sin\theta \end{cases} \begin{cases} = \sqrt{\frac{\pi}{2}(R_2 - R_1)^2 + 2R_2R_1\varphi - 2R_1^2\sin\varphi} \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ = \sqrt{\frac{\pi}{2}(R_2 - R_1)^2 + 2R_2R_1\varphi - 2R_1^2\sin\varphi} \cdot \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{cases} \quad (4)$$

上式即为环形纹理到上半圆环表面的映射函数。由于圆环的上下两部分关于 xoy 平面对称,并具有相同的 x 与 y 坐标值,因而它们映射函数是相同的,故式(4)同样可用于纹理从平面到下半圆环表面的映射。但必须指出,如果使用同一块纹理分别向圆环的上下两部分映射,则由于该两部分纹理关于导圆平面对称而可能影响映射纹理的真实感。为避免这一点,本文将两块相同类型的纹理分别用于圆环上下表面的映射,同类型的纹理可通过在一块较大的纹理上裁剪获得。

2.2 中介面上纹理接缝的消除方法

两块不同类型的纹理分别映射到圆环上下表面后,由于它们在圆环的内外两侧表面进行拼接,因而不可避免会形成两条接缝。这两条接缝在纹理平面上对应为两条圆形边界线,设其半径分别为 r_1 与 r_2 。圆环表面上接缝的邻域在纹理平面上对应为边界线邻域(如图 2 中的阴影部分所示)。为了消除纹理接缝,使纹理保持视觉上的连续性,在进行映射之前,需要对两块纹理上边界线邻域内的像素进行插值运算。这种预处理应满足以下两点要求：

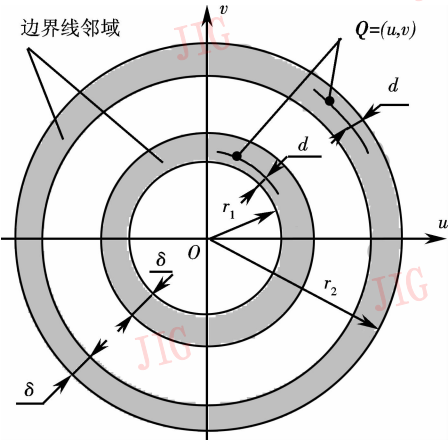


图 2 边界线邻域的插值运算
Fig. 2 Interpolation between borderline areas

- (1) 仅改变两块纹理上边界线邻域内像素的颜色,且改变颜色后的纹理与原纹理仍具有相似性;
- (2) 预处理之后,两块纹理在边界的对应位置具有相同的颜色。

边界线邻域的宽度 δ 是根据具体的纹理而设定的。本文经过多次实验得出,对于结构性纹理,其最佳取值在纹元尺寸的 1 到 2 倍之间。 $Q = (u, v)$ 为位于边界线邻域内的一个像素,其到边界的距离为

$$d = \begin{cases} \sqrt{u^2 + v^2} - r_1 & Q \in \Omega_1 \\ r_2 - \sqrt{u^2 + v^2} & Q \in \Omega_2 \end{cases}$$

其中, Ω_1 为内侧边界线邻域, Ω_2 为外侧边界线邻域。对两块纹理上位于边界线邻域内的像素进行插值运算,可给出如下公式：

$$\begin{cases} \hat{C}_1(u, v) = f(d)C_1(u, v) + [1 - f(d)]C_2(u, v) \\ \hat{C}_2(u, v) = f(d)C_2(u, v) + [1 - f(d)]C_1(u, v) \end{cases} \quad (5)$$

式中, C_1 与 C_2 分别为两块纹理上边界线邻域内点 Q 的颜色, $\hat{C}_1$ 与 $\hat{C}_2$ 为经过运算处理后得到的新颜色, $f(d)$ 为插值运算所取的权系数。为了使两块纹理在处理之后的颜色朝着边界方向逐渐变化,并在边界处达到相同的值,应该将权函数 $f(d)$ 取为距离变量 d 的单调递增函数,且满足

$$f(d) = \begin{cases} 0.5 & d = 0 \\ 1 & d = \delta \end{cases} \quad (6)$$

权函数 $f(d)$ 有多种不同的构造方法,一种简单实用的方法是将其设计为线性函数,即

$$f(d) = 0.5 + \frac{d}{2\delta} \quad (7)$$

3 O 映射算法

O 映射是指纹理从中介曲面向物体表面的映射。Bier 和 Sloan 考虑了 4 种 O 映射方式^[2],即反射光线法、物体法向法、物体中心法和中介曲面法向法,并指出,在 O 映射与 S 映射的所有可能的组合中,只有以下 5 种组合具有实用价值:(1) 中介曲面法向法/圆柱面;(2) 物体中心法/立方体面;(3) 中介曲面法向法/立方体面;(4) 物体中心法/球面;(5) 中介曲面法向法/平面。对于以圆环作为中介曲面的组合,他们尚未提到。对此,本文通过多方面的实验与分析,得出如下结论:中介曲面法向法能够

保证从圆环到环形物体表面映射的单值性、可逆性与连续性,而其他几种O映射方式效果欠佳。就是说,中介曲面法向法/圆环这种组合最具有实用价值,其可以取得较好的映射效果。下面具体讨论这种组合的O映射函数。

为了实现从中介面到目标物体表面的映射,需要适当选择圆环中介面的尺寸,以便使圆环能内接环形物体。O映射原理如图3所示,对于物体表面上的任一点 $S = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$,如果经过它作一圆环表面的垂线,相交于点 $P = (x, y, z)$,则点 P 即为点 S 的对应点,再将点 P 的纹理赋给点 S 即可实现中介曲面法向法的映射。根据圆环的形状特点可知,该射线必位于圆环的某一母线圆平面上,并通过其圆心 $\hat{O}$ 。图3中的 O 为导圆圆心,直线 $\vec{O\hat{O}}$ 为圆环的导圆平面的投影,点 $\hat{S}$ 与点 $\hat{P}$ 分别为点 S 与点 P 在导圆平面(其与坐标平面 xOy 重合)上的投影,因此有

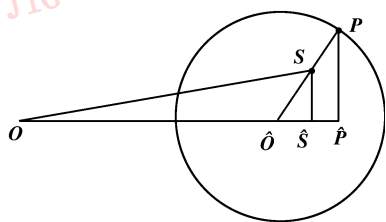


图3 O映射算法原理

Fig.3 O mapping Algorithm

$$\begin{cases} |\vec{O\hat{S}}| = \sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2} - R_2 \\ |\vec{O\hat{S}}| = \sqrt{(\sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2} - R_2)^2 + \hat{z}^2} \end{cases}$$

由相似三角形边的比例关系有

$$\frac{|\vec{O\hat{S}}|}{|\vec{O\hat{P}}|} = \frac{|\vec{O\hat{S}}|}{|\vec{O\hat{P}}|} = \frac{|\vec{S\hat{S}}|}{|\vec{P\hat{P}}|}$$

考虑 $|\vec{O\hat{P}}| = R_1$, $|\vec{O\hat{O}}| = R_2$, $|\vec{S\hat{S}}| = \hat{z}$ 可得

$$\begin{aligned} |\vec{O\hat{P}}| &= |\vec{O\hat{P}}| + |\vec{O\hat{O}}| \\ &= \frac{(\sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2} - R_2)R_1}{\sqrt{(\sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2} - R_2)^2 + \hat{z}^2}} + R_2 \\ |\vec{P\hat{P}}| &= \frac{R_1\hat{z}}{\sqrt{(\sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2} - R_2)^2 + \hat{z}^2}} \end{aligned}$$

由于点 P 与点 S 位于同一个母线圆平面内,而

母线圆与 x 轴正向的夹角可由点 S 的坐标算出,因此点 P 坐标的计算公式如下:

$$\begin{cases} x = \left[\frac{(\sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2} - R_2)R_1}{\sqrt{(\sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2} - R_2)^2 + \hat{z}^2}} + R_2 \right] \frac{\hat{x}}{\sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2}} \\ y = \left[\frac{(\sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2} - R_2)R_1}{\sqrt{(\sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2} - R_2)^2 + \hat{z}^2}} + R_2 \right] \frac{y_0}{\sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2}} \\ z = \frac{R_1\hat{z}}{\sqrt{(\sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2} - R_2)^2 + \hat{z}^2}} \end{cases} \quad (8)$$

由于上式确定了环形物体表面与圆环中介面各点之间的对应关系,因此该式即为O映射函数。

4 实验结果与讨论

笔者将上述算法用于对圆环表面进行S映射和对多个环形物体进行两步纹理映射,均取得了满意的结果,下面给出部分绘制实例。

图4为基于面积等比约束与边界线邻域插值处理的S映射实验结果。为了检测面积等比约束的S映射算法对降低纹理变形所起的作用,本文使用一块两种颜色相间的平面棋盘纹理(见图4(a))向上半中介面进行映射,得到的映射结果如图4(b)、图4(c)所示,其中图4(b)为圆环的轴向视图,图4(c)为侧视图与剖面侧视图。由该视图可以看出,棋盘纹理中的每一小方格在映射到中介面后,其面积仍保持彼此相等,且具有较小的纹理变形。当使用随机纹理图案(见图4(d)),并从中裁取两块同类型的纹理,采用面积等比约束的映射算法将它们分别映射到圆环上下两部分时,得到的映射结果如图4(e)、图4(f)所示。由该图可看出,虽然纹理变形很小,但存在两条明显的接缝。

为了说明本文算法消除纹理接缝的效果,可先采用式(7)线性插值权函数,通过式(5)在纹理平面对边界线邻域(δ 取20)进行插值运算预处理;然后再映射到圆环表面进行拼接,映射结果见图4(g)与图4(h)。不难看出,该方法不但没有改变接缝邻域内的纹理特征,但却消除了因纹理拼接而产生的接缝,取得了视觉上纹理连续的效果。

图5是环形物体的两步纹理映射实例。其中第1行示出几种不同的纹理图案;第2行示出与这些图案相对应的S映射效果;第3、4行示出采用中介

表面法向法进行 O 映射,进一步将第 2 行各圆环表面上的纹理映射到两种环形物体的表面所得的结果(从左至右各纹理的 δ 值分别取为 50,20,30,30)。由图 5 可以看出,所生成的纹理不仅在环形物体的

表面各处都保持了视觉上的连续性,而且纹理形变小,真实感强。

从运行效率来看,纹理映射比曲面纹理合成方法具有高得多的效率。图 5 实验在 2.6GHz 的 P4

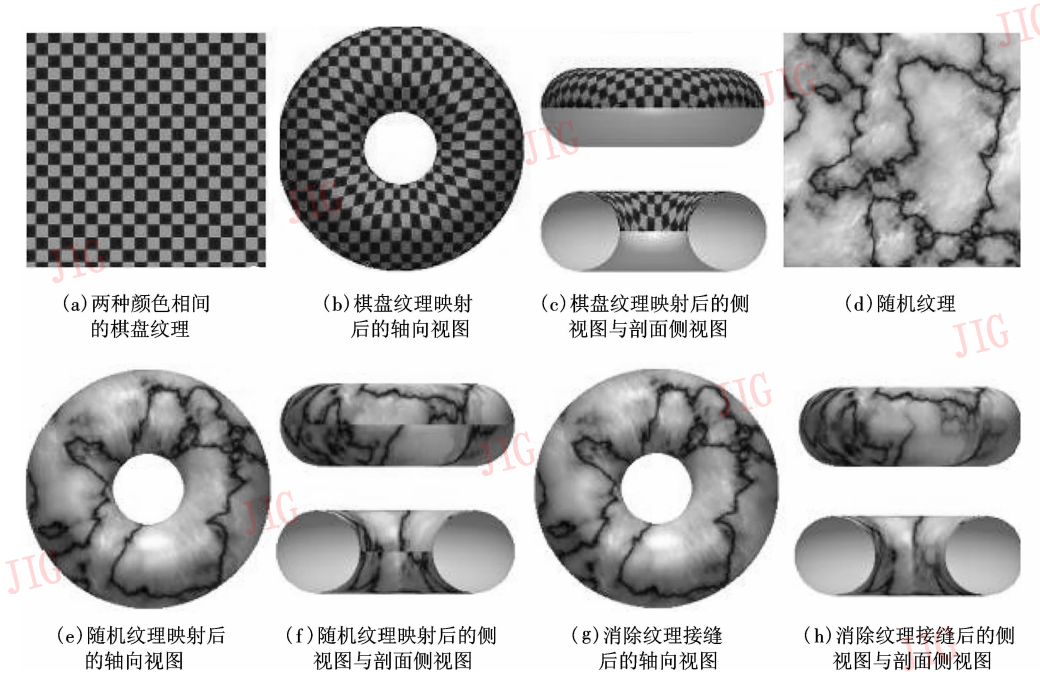


图 4 基于面积等比约束与边界线邻域插值的 S 映射实验结果

Fig. 4 S mapping result applying restraint of equal ratio of areas and Interpolation between borderline areas

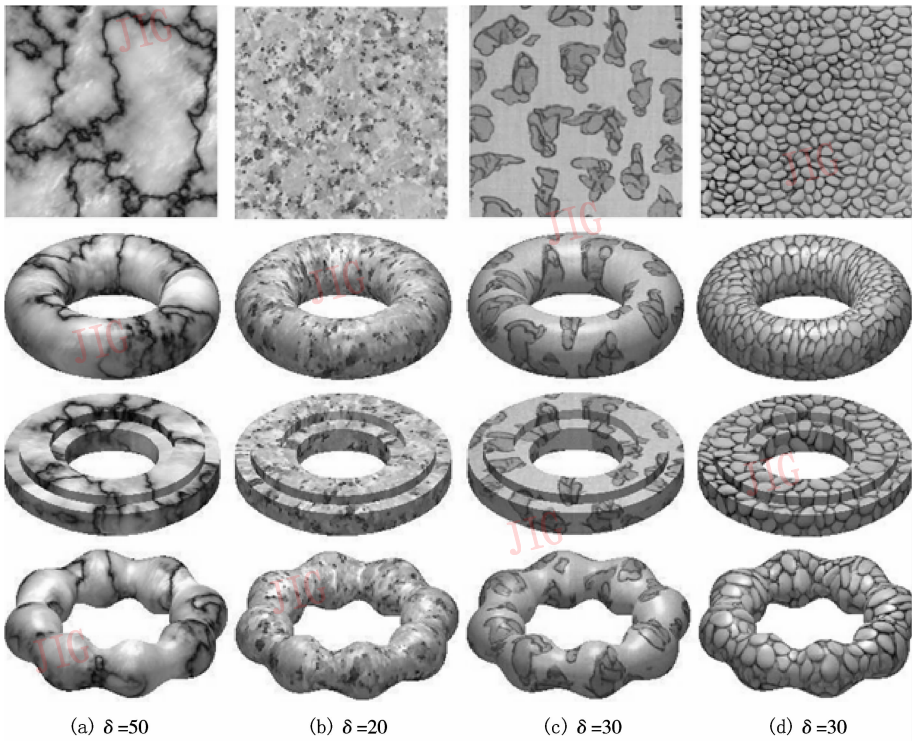


图 5 不同环形物体的两步纹理映射实例

Fig. 5 Examples of two-step texture mapping of different annular objects

微机上的平均运行时间仅为 107ms。如果采用纹理合成方法,则根据网格模型的精细程度以及纹理样图尺寸的不同,运行时间大约需要十几秒至十几分钟。特别是当纹元结构尺度较大时(例如图 4(d)的纹理),由于需要采用大尺寸的样图,从而使纹理合成时间大幅增加。可见,本文算法是快速生成高质量环形纹理的有效方法。

5 结 论

由于现实中环形物体十分常见,为此本文提出一种纹理映射算法,用于环形物体的表面纹理绘制。该算法首先选择圆环表面作为中介曲面,然后采用面积等比约束方法降低纹理变形;接着通过对边界线邻域像素进行插值运算来消除纹理接缝;最后使用中介表面法向法实现了环形物体表面的纹理映射。众所周知,映射后的纹理变形小,并在视觉上保持连续性一直是人们衡量纹理映射算法优劣的重要指标。实验结果表明,本文算法不仅能较好地满足这些要求,同时具有速度快与简便易行的特点,可应用于真实感图形绘制与虚拟现实系统,以实现环形物体表面的纹理绘制。

参考文献 (References)

- 1 Catmull E. A Subdivision Algorithm for Computer Display of Curved Surfaces [D]. University of Utah, Logan, USA, Utah, 1974.
- 2 Bier E A, Sloan K R. Two-part texture mappings[J]. IEEE Computer Graphics and Application, 1986, 6(9): 40 ~ 53.
- 3 Levy B, Mallet J L. Non-distortion texture mapping for sheared triangulated meshes[A]. In: Proceedings of ACM Annual Conference Series, SIGGRAPH[C], Orlando, FL, USA, 1998: 343 ~ 352.
- 4 Bruno Levy. Constrained texture mapping for polygonal meshes[A]. In: Proceedings of ACM Annual Conference Series, SIGGRAPH[C], Los Angeles, California, USA, 2001: 417 ~ 424.
- 5 Turk G. texture synthesis on surfaces[A]. In: Proceedings of ACM Annual Conference Series, SIGGRAPH[C], Los Angeles, California, 2001: 355 ~ 360.
- 6 Tang Ying, Sun Han-qiu, Zhang Hong-xin, et al. Texture synthesis with user-guided variance[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(10): 1412 ~ 1418. [汤颖, 孙汉秋, 张宏鑫等. 用户控制的纹理合成[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(10): 1412 ~ 1418.]
- 7 Jiang Ju-lang, Hang You-sheng. A kind of texture mapping algorithm applying to the partial area on sphere[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(9): 1112 ~ 1116. [江巨浪, 张佑生. 一种适用于球面局部区域的纹理映射算法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(9): 1112 ~ 1116.]