

消除纹理接缝的 2D-3D 纹理映射¹⁾

李笑岚^{2), 3)} 查红彬³⁾

(²⁾ 浙江工商大学, 计算机与信息工程学院计算机科学与技术系, 杭州, 310035;

³⁾ 视觉与听觉信息处理国家重点实验室, 北京大学信息科学技术学院智能科学系, 北京, 100871)

摘 要 通过小波分解技术将原始图像集合分为 2 类: 边缘图和平滑图, 然后根据人眼视觉机制, 对此两类图像选择相应的拼接技术。边缘图像采用图像缝合法进行拼接, 提出了在部分纹理图表面搜索最优缝合路径的方法。对平滑图像采用多尺度融合法拼接, 其中的多尺度融合权函数能较好地体现三维模型的几何特征。实验结果说明了本算法的有效性。

关键词 小波块; 人类视觉系统; 多尺度融合; 融合权值; 图像缝合

中图分类号 TP 391. 41

Seamless 2D-3D Texture Mapping

LI Xiaolan^{2), 3)} ZHA Hongbin³⁾

(²⁾ Computer Science and Technology Department, Zhejiang Industry and Commerce University, Hangzhou, 310035;

³⁾ National Laboratory on Machine Perception, Peking University, Beijing, 100871)

Abstract Wavelete decomposition was performed to classify the source images into two types: the edgeriched image and the smooth image. Based on the Human Visual System theory, different combination techniques, the image stitching and the image blending methods, were selected to deal with different source images. A new algorithm was proposed to find an optimized stitching path in the overlapped area of Partial Texture Maps. View dependent weight was added into the ordinary blending weight, which made the generated texture map reveal some geometric properties of the 3D model. The experimental results verify the validity of the methods.

Key words wavelet block; human visual system; multiresolution blending; blending weight; image stitching

0 引 言

真实感三维模型的生成过程包括以下 2 个主要部分: (1) 使用三维扫描仪获取对象物表面的深度数据, 并建立几何模型; (2) 通过 2D-3D 配准与融合, 将多视点彩色图像映射到几何模型的表面。在此过程中, 需要解决的主要问题有: 高效鲁棒的三维数据获取方法、三维数据降噪、三角网格生成算法、2D-3D 配准以及多视点纹理图拼接等。本文假定 2D-3D 配准以及纹理图间的配准已经完成, 只集中解决纹理图拼接问题, 即将多幅输入图像合成为一张完整无缝纹理图的过程。

受到相机视角大小的限制, 从不同角度采集多

幅图像才能得到对象物表面纹理的全部数据。物体自遮挡及视点差别导致的阴影, 光照条件不同造成的明暗变化等因素, 使得物体同一位置在不同图像中有不同的颜色值。正如图 1 (见彩色插页) 中显示的 (图中 (c) —(e) 右上角小图为红色方框部分的放大图), 如果简单地将多幅图像缝合在一起, 必然在物体表面出现非常突兀的接缝, 严重损害生成图像的真实感。相反地, 如果过分平滑图像间的接缝, 会使平滑区域的像素值和原始图像像素值间差异太大, 丢失纹理细节, 造成图像失真。因此, 图像拼接需要同时满足两个目的, 即: (1) 使生成图像中不存在突兀的接缝; (2) 尽量降低生成图像和原始图像间的失真度。

1) 国家自然科学基金 (60333010) 和国家“973”高新技术研究发展计划 (2004CB318005) 资助项目

收稿日期: 2005-11-07; 修回日期: 2006-06-15

视觉心理学^[1]的研究表明：人眼对图像边缘区信息的失真很敏感，但对图像平滑区信息的失真不太敏感。人眼对不同类型图像敏感程度的差异，意味着：(1) 对边缘图像采用直接缝合，或者很窄的平滑过渡区，能避免大的失真；(2) 对平滑图像，可以在相对宽的过渡区内进行平滑处理，得到光滑过渡的合成图像。

一般的图像缝合法^[2,3]是在 2 幅 2D 矩形图像 I_1 、 I_2 的重叠区域寻找一条误差最小路径后，将 2 个图像分别复制到此路径的两侧，得到合成图像 I 。当 I_1 、 I_2 在此路径上的误差低于人眼的感知度时，人眼感觉不到 I 中的接缝。本文将其推广为在 3D 物体表面生成纹理图的方法，并提出了在 3D 物体表面的不规则形状纹理图中搜索误差最优路径的算法。

如果通过在图像 I_1 和 I_2 间平滑过渡来减小接缝现象，那么过渡区域大小选择，以及合成权值的设定都会影响最终融合图像的质量。当图像间只存在曝光导致的差别时，简单的距离场加权平均，即羽化 (feathering)^[4,5]，就能得到很好的平滑效果。多尺度融合^[6,7]的方法在不同频道内使用不同大小的过渡区域，使图像在平滑过渡的同时保持纹理细节。Su 和 Levin 等人将融合问题放在图像梯度场中考虑^[8,9]，减少了图像全局差异对融合的影响。并且定义了度量图像融合质量的目标函数，通过优化方法获得最优权。以上方法仅在 2D 图像域考虑加权函数的定义，没有顾及物体 3D 形态对纹理图的影响。Rocchini 等人^[10,11]直接在三维几何模型表面融合纹理图。Pighin^[12]在三维模型上生成纹理图的过程中，定义了 4 个权值因子：自遮挡权、光滑性限制、方向权以及相似度限制，主要是反映物体几何特性对纹理生成的限定，几乎忽略了光照的影响。因此，只有当输入图像是光照均匀的情况，才能得到较好的结果。本文使用多尺度方法降低过渡区域大小对合成结果的影响，并且将二维图像区域的权值设置与三维模型的几何特性相结合，得到与视点方向和模型表面法线相关的图像融合权函数。最终生成的图像中不存在人眼能感觉到的接缝，并且能体现模型的几何特征。

本文第 1 节介绍算法基本流程，第 2 节详细描述算法实现过程，第 3 节给出实验结果，最后对已完成的工作进行总结，并探讨将来的工作。

1 算法概述

纹理图生成可以分成 3 个子问题——参数

化^[13]、纹理图拼接以及纹理修补。这里用柱面参数化得到三维几何模型在二维纹理空间 (UV 平面) 的对应纹理网格，记为 UVmesh，其对应关系如图 2 所示。那么，在三维模型和二维图像配准后，UVmesh 中大部分纹理点能在输入图像中找到一个或多个对应像素。通过对输入图像重采样、拼接以及修补后，就可得到一张无缝的完整纹理图，记为 UVmesh。

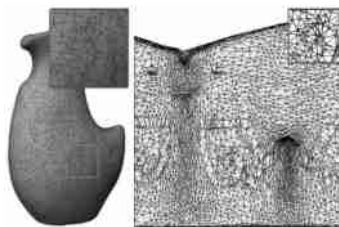


图 2 参数化 3D 模型

Fig. 2 Parametization of 3D model

假设参数化和重采样已经完成，那么对于每张输入图像 I_i ，都有一张不完整纹理图 $UVTexture_i$ ，其中 $i = 1, 2, \dots, num$ ， num 是输入图像的总数 ($UVTexture_i$ 的生成过程请参看文献 [14])。以 $UVTexture_i$ 作为处理对象，本文的图像拼接算法流程如图 3 所示，具体算法步骤如下：

- 1) 得到 2 个图像的重叠区域图像 I_1^{ov} 、 I_2^{ov} ，分别计算其小波块 (wavelete block) 系数；
- 2) 如果 2 个图像的小波块系数都小于给定值 T_1 ，那么 I_1^{ov} 和 I_2^{ov} 是光滑图像 (平滑区比重较大的图像)，将 2 个图像用多尺度融合法合成；
- 3) 否则，输入的不是光滑图像。计算两者误差，得到两者缝合的最优路径。

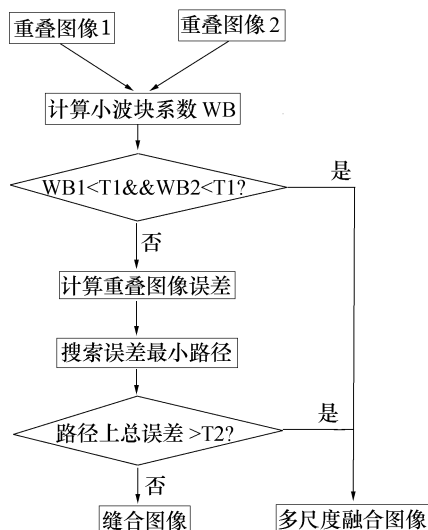


图 3 图像拼接算法流程图

Fig. 3 The flow chart of image combination

4) 当路径上总误差小于给定值 T_2 时,直接缝合 2 个图;否则,仍然采用多尺度融合。

要求输入图像集合必须包含物体表面全部的颜色信息,但是物体自遮挡等原因使得某些区域数据缺失,导致融合后的纹理中存在空洞。不过,这种区域的数量很少,在此用邻域插值法来修补这些空洞^[14]。

2 具体实现

2.1 图像分类

对输入图像进行小波变换后,小波变换域中的几个块能表示图像空间域上的一个像素块,其位置关系可由一棵四叉树表示。根据子块所在的方向,可得到水平、竖直和对角 3 棵子树,称为小波子树(如图 4 所示)。所有具有相同树根的 3 个不同方向的四叉小波树组织在一起可形成具有固定大小的块,统称为小波块(如图 4 所示)。小波块的块数为低频带系数的个数,它把空间域同一位置不同尺度、不同方向的小波系数组织在一起,从而把小波系数和它代表的空间域联系在一起。

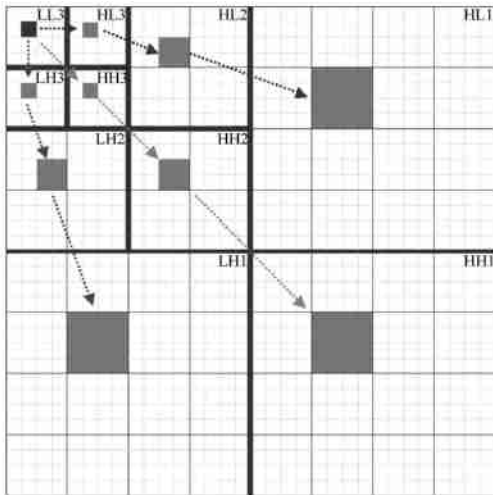


图 4 小波块示意图

Fig. 4 The wavelet block

人类视觉系统对不同类型图像的敏感度的差异^[1],促使大家将图像进行分类。根据小波块的系数值,将图像分为 2 类:具有较多边界和纹理信息的为一类,记为 S_1 ;光滑区域较多的为一类,记为 S_2 。

大的小波系数对应着原始图像的像素突变点,因此一个小波块内大的小波系数越多,边缘就越强。即如果 $\text{number}\{\text{abs}(F(u, v)) > T_f \mid (u, v) \text{ 在 } WB_k \text{ 内}\} \geq T_n$,则小波块 $WB_k \in S_1$;否则, $WB_k \in S_2$,其中 T_f 和 T_n 为预先设定的域值。如果一张图像中属于

S_1 的小波块超过 60%,此图像被定义成边缘图像,反之则是光滑图像。

2.2 图像缝合

一方面,人类视觉系统对于边缘图像的失真非常敏感;另一方面,图像缝合法带来的图像失真最小。所以在输入图像被归类于边缘图像后,缝合法是首选方案,其关键步骤是在误差表面寻找一条误差最小路径,使两图像在此路径上匹配得最好,即在路径上的总误差最小。

假设两矩形输入图像 I_1 、 I_2 沿垂直方向的重叠区域图像为 I_1^{ov} 、 I_2^{ov} ,误差表面定义在重叠区域内,表示为 $e_{i,j} = \text{abs}(I_1^{ov}(i, j) - I_2^{ov}(i, j))$,其中 $i = 1, 2, \dots, w^{ov}$, $j = 1, 2, \dots, h^{ov}$, w^{ov} 和 h^{ov} 分别是重叠区域的宽度和高度。为了找到最优路径,作者遍历 e ,并对所有路径计算其累计最小误差 $E: E_{i,1} = e_{i,1}$ 。

$$E_{i,j} = e_{i,j} + \min(E_{i-1,j}, E_{i-1,j+1}), \quad j = 2, \dots, h^{ov}. \quad (1)$$

找到 E 在最后一行的最小值就即找到整个误差表面上的最优垂直路径 $P_{ath} = \arg \min_{i=1, \dots, w^{ov}} (E_i)$ 。同样的过程可用于搜索水平重叠方向的路径。图 5 第 1 行给出规则区域路径搜索的示意图以及图像缝合的实例,(图 5(a1))中的绿色曲线表示最小误差路径。

如图 5(b2) 中所示,当输入图像是不规则形状时(不完整纹理图 UVTexture 极有可能不是规则形状),将以上最优路径搜索方法修改如下:

- (1) 计算两输入图像的误差函数 $e_{i,j}$,并设其非重叠区域的误差为 -1;
- (2) 逐行扫描误差图,得到最长重叠列的长度 T_{len} ;
- (3) 从误差图第 i 列中第一个不等于 -1 的像素开始计算累计误差 $E_{i,j}$;
- (4) 如果在路径 i 上连续有 5 个误差值等于 -1,路径 i 结束,记录其长度为 $\text{len}(\text{Path}_i)$;
- (5) 在所有满足 $\text{len}(\text{Path}_i) > T_{len} - 5$ 的路径集合中,找到累计误差 $E_{i,j}$ 最小的那条路径,即为要求的不规则纹理图上的最优路径。

图 5 第 2 行给出不规则路径搜索的示意图以及图像缝合的实例,(图 5(b1))中左边绿色曲线表示最小误差路径,右边红色曲线表示不满足长度要求的误差路径。

2.3 多尺度融合

普通的羽化方式对融合区域大小的选择非常敏感,如果融合区域太小,不足以消除接缝;反之,

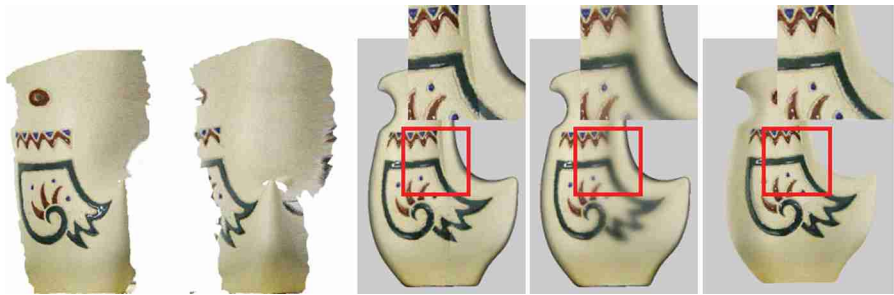


图 1 图像拼接方法对模型纹理映射结果的影响

Fig. 1 The results of different image combination methods

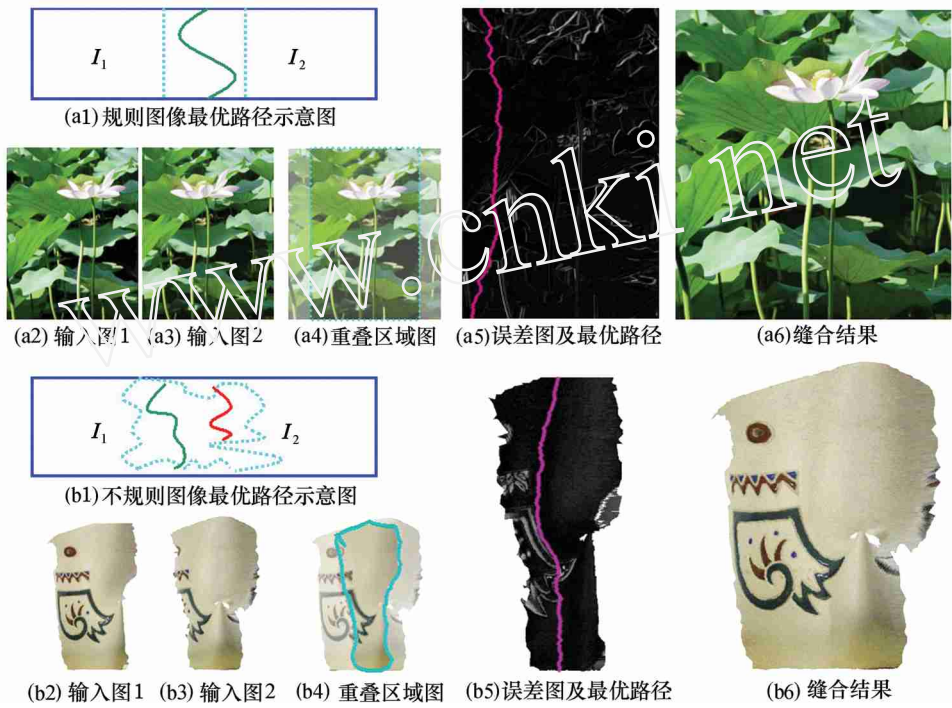


图 5 最优路径缝合示意图

Fig. 5 The demonstration of image stitching along optimizing path



图 6 比较用 2 种不同方法合成规则图像的结果

Fig. 6 Comparing the results acquired with multiresolution blending and optimizing path stitching

细节信息被过度平滑,导致结果图像失真。多尺度融合将图像分解到不同的频域,在高频部分用小融合区,低频部分用大融合区,能在消除接缝的同时最大限度地保存图像原有的细节信息,是很好的图像融合方法。

首先需要确定被融合图像重叠区域的位置和大

小。以垂直方向重叠的图像为例,对于规则图像,融合区域的宽度定义为重叠区域宽度的一半。对于不规则图像,确定融合区域宽度的过程是:(1) 计算图像的重叠区域 M ; (2) 逐行扫描误差图,得到最长重叠列的长度 T_{len} ,并记下此列的位置 $Keypos$; (3) 从 $Keypos$ 开始,分别向左、右两个方向扫描,直到某一

列中属于重叠区域的像素个数 $\text{Num}_{\text{in}} < T_{\text{len}} - 5$, 停止扫描, 记左、右停止位置为 s_l 、 s_r 。那么, 融合区域宽度 $w = s_r - s_l + 1$ 。

目前存在的纹理融合方式都只在二维图像域考虑合成问题, 即把在某视点得到的部分纹理图 (UVTexture) 单纯地作为图像考虑, 其权函数只包含模板函数和某一单调函数 (例如羽化权)。实际上, UVTexture 是将二维图像匹配到三维几何模型表面, 再将三维模型参数化到纹理空间后产生的, 它和物体的几何性质息息相关。因此, 将物体基于视点的几何属性作为权函数的一部分, 定义权函数为

$$W = W_m \cdot W_f \cdot W_v, \quad (2)$$

其中

(1) W_m 是模板权, 若 $(i, j) \in M$, 则 $W_m(i, j) = 1$; 否则 $W_m(i, j) = 0$;

(2) W_f 是羽化权, $W_f(i, j) = 1 - (i - s_l) / w$;

(3) W_v 是几何权,

$$W_v(i, j) = \frac{(\mu_{i,j}, D_k) - \min_{(i,j) \in M} (\mu_{i,j}, D_k)}{\max_{(i,j) \in M} (\mu_{i,j}, D_k) - \min_{(i,j) \in M} (\mu_{i,j}, D_k)}, \quad (3)$$

$(\mu_{i,j}, D_k)$ 是像素 (i, j) 对应的模型上三维点的法线值 $\mu_{i,j}$ 与第 k 幅图像的拍摄方向 D_k 之间的内积 (被拍摄物体被放置在带刻度的转盘上, 拍摄方向即转盘转动的角度)。 $\mu_{i,j}$ 通过重心坐标计算公式 $\mu = \alpha \cdot N(v_1) + \beta \cdot N(v_2) + \gamma \cdot N(v_3)$ 得到, 其中 $N(v_i)$ 是顶点 v_i 的法线方向。此 3 个权值分别表示纹理图的重叠区域, 重叠区域内像素离融合区域边界的距离, 以及物体表面法线方向与当前拍摄方向的夹角。增加第三项几何权之后, 如果物体表面某部分的法线方向和当前视角差别很大, 这部分纹理则被视为无效, 在一定程度上改善了最终合成纹理的质量, 从试验结果能看到改善的程度。

3 实验结果

对于规则形状的输入图像, 分别用图像缝合与双尺度融合的方法得到如图 6 所示的结果。输入图像属于边缘丰富的图像, 光照较均匀, 但两图像间存在的细微匹配误差带来了像素差异。用多尺度融合的方法, 图中出现鬼影 (如图 6(c) 紫色方框中所示); 用最优路径缝合法得到的合成图像, 其局部图没有鬼影, 并且和输入图 2 的局部图完全一致 (如图 6(d))。误差表面的最优路径见图 5(a5), 路径上像素的平均误差为 3.504 16。

图 7 比较用不同权函数融合部分纹理图的结果。

第一排是几何模型和 3 幅输入图像 (图 7(a)), 以及根据输入图像生成的部分纹理图 (图 7(b))。使用前面定义的模板权和几何权 (图 7(c)), 不限融合半径, 用单一尺度进行纹理图融合的结果如图 7(d) 所示。使用多尺度方法, 权函数不包括几何信息 (图 7(e)), 其融合结果如图 7(f) 所示。使用多尺度方法, 且在权函数中包括几何权、模板权、羽化权这三项 (图 7(g)), 其结果如图 7(h) 所示。由于权函数以及融合半径的不同, 导致融合结果很不一样。从局部图 (紫色矩形框) 中看到, 鼻翼部分 ((d) 左上角) 出现的黑印, 是由于没有限定融合半径, 将有匹配误差的右侧面部分纹理区域和正确的正面部分纹理融合导致的; 限定融合范围后 ((h) 左上角), 黑印消失。发际部分 ((d) 右下角) 存在的接缝, 是简单融合不能消除光照差异的影响而带来的; 用多尺度融合后 ((h) 右下角), 过渡很平滑。由于没有应用几何权 ((f) 右上角), 多尺度融合将左边纹理图中空洞的部分和右边纹理图融合在一起了, 所以出现了下巴左侧的接缝; 增加几何权后 ((h) 右上角), 接缝消失。

图 8 显示纹理映射后从多个视点绘制花瓶的结果。8(a) 是花瓶几何模型。8(b) 上排是 5 幅输入图像, 下排是根据此输入图像生成的部分纹理图。由于拍摄时候没有控制光照, 因此不同输入图像的光照条件不一致。通过拼接和多尺度融合两种方式合成纹理图 (2, 3 视点间是通过最优路径缝合, 其他视点间用多尺度融合), 得到失真较少且接缝不明显的完整纹理 8(c)。8(d) 中绘制模型的第一个视角和输入图像 1 一样, 其他是从新视角绘制的模型。

4 结 论

本文的主要贡献是: (1) 从人眼视觉掩盖特性出发, 对图像进行小波分析后, 将处理对象图分成光滑图像和边缘图像两类。对边缘图像搜索误差最小路径后, 根据路径上平均误差的大小, 选择使用缝合或多尺度融合方法来合成图像。对光滑图像, 直接采用多尺度融合法; (2) 用多尺度方法生成几何模型纹理图的时候, 在其融合权函数中引入与视点相关的几何权值, 使最终合成纹理图更好地适应模型的几何性质。

虽然文中提出的方法能较好地消除图像间的接缝, 但合成图像中还是能见到镜面反射区域、明暗交接区域等产生的颜色失真。希望能对输入图像先做预处理, 消除这些环境光照的影响, 得到物体反射率图像, 从而实现虚拟光照情况下的模型绘制。

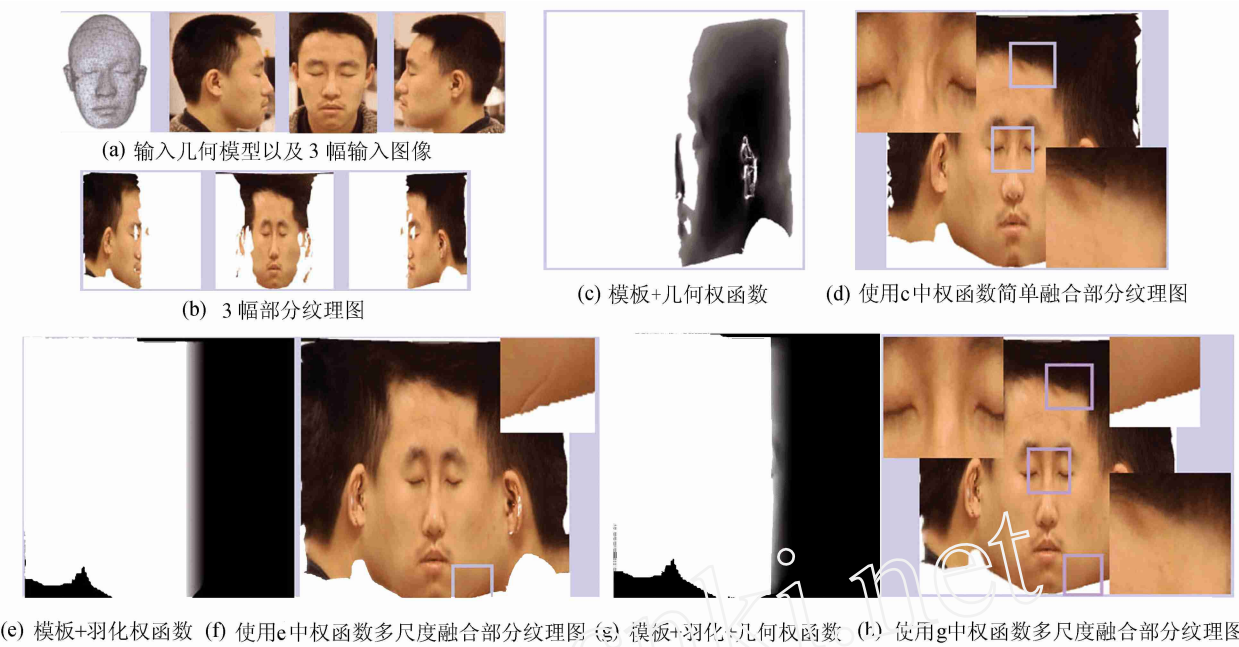


图 7 权函数定义以及融合区域限制对合成纹理图的影响

Fig. 7 The definition of weight functions and their effects for the texture map combining



图 8 纹理映射后绘制的花瓶图像

Fig. 8 The rendering results from different viewpoints

参 考 文 献

[1] BLAKEMORE C, CAMPBELL F W. On the existence of neurones in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images [J]. Journal of Physiology, 1969, 203: 237-260.

[2] EFROS A A, FREEMAN W T. Image quilting for texture synthesis and transfer [C]. Proc of SIGGRAPH 2001. Los Angeles: ACM, 2001: 341-346.

[3] DAVIS J. Mosaics of scenes with moving objects [C]. Proc of CVPR. Santa Barbara: IEEE, 1998: 354-360.

[4] SZELISKI R, SHUM H Y. Creating full view panoramic

image mosaics and texture-mapped models [C]. Proc of SIGGRAPH'97. Los Angeles:ACM, 1997: 251-258.

[5] UYTENDAELE M, EDEN A, SZELISKI R. Eliminating ghosting and exposure artifacts in image mosaics[C]. Proc of CVPR. Hawaii: IEEE, 2001: 509-516.

[6] BURT P J, ADHLSON E H. A multiresolution spline with application to image mosaics[J]. ACM ToG, 1983, 2(4): 217-236.

[7] HSU C T, WU J L. Multiresolution mosaic[J]. IEEE Trans Consumer Electron, 1996, 42: 981-990.

[8] SU M S, HWANG W L, CHENG K Y. Analysis on multiresolution mosaic images [J]. IEEE Trans. Image Processing, 2004, 13(7): 952-959.

[9] LEVIN A, ZOMET A, PELEG S, et al. Seamless image stitching in the gradient domain [C]. Proc of ECCV'04. Prague: Springer-Verlag LNCS, 2004: 377-389.

[10] ROCCHINI C, CIGNONI P, MONTANI C. Multiple textures stitching and blending on 3D objects [C]. Proc of 10th Eurographics Workshop on Rendering. Granada, Spain: Springer, 1999: 127-138.

[11] ROCCHINI C, CIGNONI P, MONTANI C, et al. Acquiring, stitching and blending diffuse appearance attributes on 3D models[J]. The Visual Computer, 2002, 18(3): 186-204.

[12] PIGHIN F, HECKER J, LISCHINSKI D, et al. Synthesizing realistic facial expression from photographs[C]. Proc of SIGGRAPH'98. Los Angeles: ACM, 1998. 75-84.

[13] YAMAUCHI H, LENSCH H P A, HABER J, et al. Textures revisited[J]. Visual Comput, 2005, 21(4): 217-241.

[14] LI X L, ZHA H. B. Realistic human head modeling with multi-view hairstyle reconstruction[C]. Proc of the 5th Inter Conf on 3-D Digital Imaging and Modeling. Ottawa, Canada: IEEE, 2005: 432-438.

* * * * *

校内要闻

北大医学部研制的肿瘤抗原疫苗被批准进入新药临床研究

北京大学医学部免疫学系陈慰峰院士领导的 T 细胞研究室在肿瘤抗原克隆鉴定及免疫应答分析、肿瘤疫苗研制等方面取得显著成果。近期,该实验室顺利完成了癌-睾丸抗原(CT 抗原)NY-ESO-1 抗原肽(NY-ESO-1b)的临床前研究工作,他们研制的肿瘤抗原 NY-ESO-1b 多肽疫苗现已通过中国药品食品监督管理局(CSFDA)药审中心评定,获得新药临床研究批文。

在国家“863 计划”等科学基金支持下,陈慰峰院士实验室建立了肽-MHC 分子四聚体(tetramer)、IFN- γ 及 GranzymeB/perforin 释放的酶联免疫斑点法(ELISPOT)、胞内细胞因子释放法等国际公认的检测特异性细胞毒性 T 淋巴细胞(CIL)的实验体系。借助这些先进方法,该实验室证明了在肝癌患者中,约有 1/3 病人对 NY-ESO-1b 抗原肽有特异 CIL 应答;通过 ELISA 方法检测,约有 30.8%的患者体内自发产生了针对 NY-ESO-1 抗原的体液免疫应答;同时发现在 HLA-A2 + NY-ESO-1 mRNA + 患者存在功能性超型,这更加扩展了该疫苗的适用人群。

临床前研究显示,肿瘤抗原 NY-ESO-1b 多肽疫苗可诱导肝癌病人产生特异的针对 NY-ESO-1b 多肽的细胞免疫应答,可望有效杀伤手术后残留癌细胞,是一种有效的肝癌辅助治疗手段。

研究过程中,该实验室与美国 LUDWIG 肿瘤研究所建立了密切的科技合作关系,双方将继续深入开展后续合作研究。目前,该实验室已着手进行肿瘤抗原 NY-ESO-1b 多肽疫苗治疗肝癌的 I 期临床试验研究,将为该多肽疫苗的改进及进入 II 期临床试验提供可靠的实验依据,为今后的推广应用奠定坚实的基础。

(摘自北大新闻网 2006-09-07)