

偏微分方程约束的基于模块的图像修复模型

仵冀颖 阮秋琦

(北京交通大学信息科学研究所, 北京 100044)

摘要 为了对大规模目标区域的图像进行修复,提出了一种既能保持线性特征和纹理信息,又能应用于大规模目标区域的基于模块的图像修复模型。该模型首先使用像素切向等照度线强度约束修复优先级,由于切向等照度线方程在图像边缘宽度约束下扩散,因此具有很好的线性特征保持性能。这种扩散具备形态学不变性,可修复自然场景图像;然后采用 Euclidean 距离计算模块相似度,并加入偏微分方程约束,使得线性特征位置的像素点在匹配中影响较大;使用散度约束下总体变分插值法对修复结果进行无缝效应处理,使得最终修复结果平滑;最后扩展模型相似度函数,使目标区域可被修复为指定的纹理特征。理论和实验结果证明该模型在图像修复中是有效的。

关键词 图像修复 偏微分方程 总体变分 切向等照度线 无缝效应

中图分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)11-1980-08

Exemplar-based Inpainting Model Constrained by Partial Differential Equation

WU Ji-ying, RUAN Qiu-qi

(Beijing Jiaotong University, Institute of Information Science, Beijing 100044)

Abstract In this paper a novel large target region image inpainting model which can preserve linear structure and texture information is proposed. The model uses a cross isophotes diffusion equation constrain the inpainting order. The cross isophotes equation diffuses considering the edge extent, so the model has good linear structure preserving property. Diffusion of cross isophotes is morphologically invariant and it can fill the target region of the natural scene very well. The euclidean distance is used as the similarity function, while the partial differential equation constraint which is used to enlarge the effect of pixels in linear structure is employed. To reduce the seams caused by this model, and achieve a seamless image, a total variation interpolation constrained by gradient is used in the inpainted result. At last the similarity function is extended, and the target region can be inpainted to the assigned texture. Both theoretical analysis and experiments have verified the validity of the new model.

Keywords image inpainting, partial differential equation(PDE), total variation(TV), cross isophotes, seamless

1 引言

随着数字图像处理技术的发展,通过填充图像中缺失信息的区域,使图像满足人眼视觉系统要求的研究成为热点。该技术还可应用于去除图像中的目标区域,仅保留需要的信息。这种修补缺失信息

或移除目标区域的图像处理技术称为图像修复(image inpainting)。

Bertalmio 首先提出一种基于信息传输的图像修复模型^[1]。该模型利用各向异性扩散的偏微分方程(partial differential equation, PDE)沿边缘方向传输不同的图像信息,以修复目标区域。Tony 等在此研究基础上,提出了总体变分(total variation,

基金项目:国家“973”高技术研究发展规划基金项目(2004CB318005);国家自然科学基金资助项目(60472033);教育部博士点基金资助项目(20030004023)

收稿日期:2006-04-19;改回日期:2006-08-14

第一作者简介:仵冀颖(1982-),女,2000年获北京交通大学学士学位,现为北京交通大学信息科学研究所读博士研究生。研究方向为图像处理、偏微分方程、小波分析。E-mail: happywjy82@126.com

TV) 修复模型^[2]及 CDD (curvature driven diffusion) 模型^[2,3]。由于 PDE 是基于图像几何特征,通过像素间差分来实现扩散,所以 PDE 修复模型具有很好的线性特征保持性能,但 PDE 扩散不能保持图像纹理信息,只能用于小区域图像修复,若待修复的目标区域较大,则修复结果会产生很大的失真。

Efros 提出一种基于模块的图像分析模型^[4,5],与 Bertalmio 提出的使用 PDE 的模型相比,基于模块的模型不仅处理速度快,且能够保持图像纹理信息;Bornard 等首先使用基于模块的模型修复自然场景图像^[6]。Patrick 证明在自然图像中,基于模块模型的修复效果仍优于 PDE 模型^[7]。由于基于模块的修复模型不是图像几何特征作用的结果,因此不能保持图像中的线性特征。

本文使用 PDE 约束图像中模块的修复顺序和相似度函数,提出一种 PDE 约束的基于模块的图像修复模型。该模型采用像素点切向等照度线的 TV 模型强度作为数据项约束修复顺序。由于切向等照度线扩散能保持多种情况下的线性特征,且 TV 模型具有形态学不变性,因此能更好地修复自然场景图像。在基于模块的匹配操作中,由于单个像素点的相似性对匹配结果影响大,因此本文采用 Euclidean 距离来衡量模块间的相似度。为了更好地保持图像线性特征,本文使用切向等照度线强度约束相似度函数来提高线性特征位置上像素点在模块匹配中的作用。由于基于模块的修复模型会引起模块边缘接缝效应,故本文使用散度约束的插值模型来对修复结果进行无缝效应处理,使得自然图像修复结果平滑。文章最后对修复模型相似度函数进行了扩展,使得模型可将目标区域修复为指定的纹理特征。

2 PDE 约束的修复模型执行过程

2.1 切向等照度线强度约束修复顺序

基于模块的图像修复模型是按照一定的优先级顺序将图像中与待修复目标区域最相似的模块复制到目标区域中,因此首先应确定修复的优先级顺序。传统的基于模块的模型是由目标区域边缘向内部修复 (onion-peel)^[4,6,7]。由于区域边缘图像模块中已知像素点较多,所以这种对修复顺序的约束称为置信度约束,即

$$C(p) = \frac{\sum_{q \in \Psi_p \cap (I-\Omega)} C(q)}{|\Psi_p|} \quad (1)$$

其中, p 为待处理像素, Ψ_p 为图像模块, $|\Psi_p|$ 为模块面积大小, q 为模块中的像素,初始状态下已知像素的置信度约束 $C(\cdot)$ 值为 1,未知像素的置信度约束为 0,随着修复过程的进行,更多像素点变为已知,需更新像素的置信度约束 $C(\cdot)$ 值为 1。由于 Onion-peel 顺序没有考虑图像中的线性特征,因此在修复纯纹理图像时的效果好,且速度快;而处理自然场景图像时,因丢失线性特征,故修复效果较差。PDE 是一种图像几何特征驱动下的各向异性扩散方程,其扩散过程可保持图像中的线性特征。为使沿线性特征位置的像素具有较高的修复优先级,本文引入切向等照度线 PDE 扩散强度作为数据项约束,记作 $D(p)$ 。TV 模型沿切向等照度线方向扩散传输优化目标区域的总体变分值^[8]。取 TV 模型扩散的 PDE 为 $D(p)$:

$$u_t = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) = \frac{1}{|\nabla u|} (u_{t,t_1} + u_{t,t_2}) = \frac{1}{|\nabla u|} u_{tt} \quad (2)$$

$$u_{tt} = \frac{1}{|\nabla u|^2} (u_x^2 u_{y,y} + u_y^2 u_{x,x} - 2u_x u_y u_{x,y}) \quad (3)$$

其中, u 为图像中像素的灰度值, u_t 为像素更新的灰度信息, u_x 表示像素灰度值 u 的 x 方向的一阶导数, u_y 表示像素灰度值 u 的 y 方向的一阶导数, $u_{x,x}$ 为两个方向的二阶导数, u_{tt} 为沿边缘方向的二阶导数,用于控制扩散方向。TV 模型具有形态学不变性^[5],该形态学不变性是指对断裂等照度线的修复不依赖于单个像素点,而依赖于图像的几何特征。由于 TV 模型的扩散项取决于等照度线曲率 $\nabla \cdot [\nabla u / |\nabla u|]$,而不是相关像素值,因此可以保持图像的线性特征。TV 模型是具有数学分析基础各向异性扩散方程,其扩散系数为 $1/|\nabla u|$ 。

将沿等照度线方向的像素灰度值 u 记为 $u = \lambda$, $d\lambda$ 表示长度元素:

$$\frac{d\lambda}{dt} = |\nabla u| \quad (4)$$

其中, $|\nabla u|$ 为切向等照度线方向线性结构的变化,TV 模型扩散依赖于等照度线间的差异,即扩散系数 $1/|\nabla u|$ 。修复模型中数据项应为正,修正 TV 模型扩散数据项约束为

$$D(p) = |u_t| = \left| \frac{1}{|\nabla u} \cdot u_{tt} \right| \quad (5)$$

当模块中像素的梯度绝对值 $|\nabla u|$ 大,则区域没有严格的等照度线,即 Ψ_p 无线性特征,若 $D(p)$ 小,则模块 Ψ_p 优先级低;当像素的梯度绝对值 $|\nabla u|$ 小

时,则等照度线间的差异小,此时 Ψ_p 处于等照度线方向,为保持线性特征, Ψ_p 应具有较高优先级。

PDE 约束的基于模块修复模型的优先级为置信度和数据项的乘积,即已知像素点较多,且位于图像线性特征位置的像素模块具有较高的修复优先级。

$$P(p) = C(p)D(p) \quad (6)$$

Criminisi 采用沿等照度线方向传输的 PDE 作为数据项约束^[9,10],这种约束传输沿相邻像素的等照度线进行,且等照度线间无交互,而目标区域边缘的像素,则依据各自的等照度线都有较高的优先级,各部分分别传输,直到区域全部修复完毕,但这种传输方式并不具备形态学不变性^[5]。Onion-peel 顺序和两种数据项约束顺序的修复模型的线性特征保持性能见图 1,可选中凸形修复目标区域。图 1(c)为采用 onion-peel 顺序基于模块的修复模型的处理结果,这种模型修复顺序因仅由置信度约束 $C(p)$ 控制而不能保持线性特征,即处理结果有明显的凸起;图 1(d)为 Criminisi 模型的处理结果,处理时,首先沿线性特征进行修复,但由于对各向同性区域的修复先于一些线性特征,所以 Criminisi 模型不能完全保持图像线性特征;图 1(e)为本文提出的切向等照度线数据项约束模型的修复过程,该模型优先修复图像线性特征区域,且完全保持图像线性特征。由图 1 处理结果可知,当待修复的目标区域为任意形

状,本文提出的置信度 $C(p)$ 和切向等照度线数据项 $D(p)$ 乘积约束修复顺序的模型,均可以保持图像中的线性特征,其修复效果优于已有的模型。

2.2 PDE 约束相似度函数

修复优先级顺序确定后,再按照该顺序寻找填入目标区域的图像模块;然后使用相似度函数计算模块间距,用于匹配与目标区域最相似的模块。模块间距记作对应像素点间距离的总和,计算像素点间距离的通用函数为 L_m :

$$L_m(p_1, p_2) = (|x_1 - x_2|^m + |y_1 - y_2|^m)^{1/m} \quad (7)$$

其中, p_1, p_2 表示像素点,常用的距离 L_m 为 Manhattan 距离^[11] 和 Euclidean 距离^[4,5,12]。Manhattan 距离为

$$L_1(p_1, p_2) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \quad (8)$$

而 Euclidean 距离为

$$L_2(p_1, p_2) = (|x_1 - x_2|^2 + |y_1 - y_2|^2)^{1/2} \quad (9)$$

Manhattan 距离公式中,单个像素点间差异影响小,如果模块中仅有一点不匹配,那么该模块的相似度依然很高。在基于模块的修复模型中,由于每次填入的是整个图像模块,所以要求模块中每个像素点间距都小,即都为最相似,此时单个像素点的差异影响应较大,可见 Manhattan 距离不合适。本文采用 Euclidean 距离测量模块间的相似度,模块间若有一点完全不匹配,则该点距离为平方项的和,由于整个模块间距大,因而该模块具有较低的相似度;只有模块中每个像素点都为待修复模块的最相似像素时,该模块才会被填入到目标区域中。为加快计算速度,本文采用欧氏距离的平方项进行度量:

$$d(p_1, p_2) = L_2^2(p_1, p_2) = |x_1 - x_2|^2 + |y_1 - y_2|^2 \quad (10)$$

该距离称为像素点间的平方差分总和距离。为了更好地保持图像中的线性特征,可使用切向等照度线扩散的 PDE 强度约束距离公式,即具有较大切向等照度线强度的线性特征像素点应具有较高相似度。相似度计算公式为

$$d(\hat{\Psi}_p, \Psi_q) = \sum_{p_1 \in \hat{\Psi}_p, p_2 \in \Psi_q} D(p_1) \cdot d(p_1, p_2) \quad (11)$$

$$\hat{\Psi}_q = \arg \min_{\Psi_q \in \Phi} d(\hat{\Psi}_p, \Psi_q)$$

其中, $D(p_1)$ 为像素点切向等照度线 PDE 强度值, Ψ_q 为已知图像模块, p_2 为 Ψ_q 中像素, $\hat{\Psi}_p$ 为已经部分修复的模块, p_1 为 $\hat{\Psi}_p$ 中像素, $d(\hat{\Psi}_p, \Psi_q)$ 表示模块间距, $\hat{\Psi}_q$ 为与目标区域最相似的模块。 $\hat{\Psi}_q$ 确定后,再依次拷贝像素灰度值至 Ψ_q ,若模块线性结构

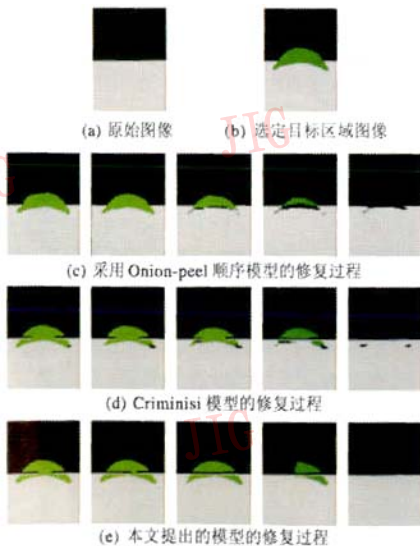


图 1 不同数据项约束的基于模块模型的修复结果
Fig. 1 Images inpainted by different data term constrained exemplar-based models

和纹理信息同时拷贝,则可以保持图像的纹理特征。一次修复过程结束后,新的像素变为已知,需更新置信度函数:

$$C(p) = \hat{C}(p), \forall p \in \hat{\Psi}_p \cap \Omega \quad (12)$$

其中, Ω 为全部图像域。

计算置信度和数据项约束及相似度函数的过程循环执行,直到 Ω 内像素灰度值全部计算完毕,修复过程完毕。

3 PDE 约束的无缝效应处理

以图像模块为基本单元的修复模型与基于单个像素点的模型相比虽提高了修复处理速度,但填入的图像模块也带来了严重的接缝效应(seams),例如修复自然图像时,模块边缘清晰可辨识,严重影响修复效果。接缝效应类型主要有:颜色强度变化引起的接缝,纹理特征间的接缝及线性特征间的接缝。

本文提出的模型可根据不同像素位置的切向等照度线强度选择修复顺序,这种操作虽避免了线性特征接缝效应,但却造成修复模块间顺序混乱、模块重叠,且重叠区域形状无规律。这种重叠在一定程度上能够减弱颜色强度变换和纹理特征带来的接缝效应,但在修复平滑图像时会出现明显的模块接缝。本文根据 PDE 在图像插值中的应用,采用散度约束下重叠区域图像融合技术来去除模块的接缝效应。

PDE 表层插值法(Membrane Interpolate)为

$$\min_u \iint_{\Omega} |\nabla u|^2 \quad \text{s. t.} \quad u|_{\partial\Omega} = \hat{u}|_{\partial\Omega} \quad (13)$$

其中, \hat{u} 为已知的图像像素值,通过优化式(13)即可得到目标区域像素值。由于 TV 空间中的非线性处理可保持图像边缘特征^[6],因此本文在 TV 空间中实现插值,即

$$\min_u \iint_{\Omega} |\nabla u| \quad \text{s. t.} \quad u|_{\partial\Omega} = \hat{u}|_{\partial\Omega} \quad (14)$$

并由 Euler-Lagrange 方程实现最优化操作:

$$\operatorname{div}\left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|}\right) = 0 \quad \text{s. t.} \quad u|_{\partial\Omega} = \hat{u}|_{\partial\Omega} \quad (15)$$

其中,div 为散度算子,即散度约束下的 TV 插值。

之所以本文的重叠区域插值方法与简单的图像插值操作不同,因为其待插入的区域 $\hat{\Omega}$ 中有已填充到目标区域中的像素值: $u|_{\partial\hat{\Omega}} = \hat{u}|_{\partial\hat{\Omega}}$ 。填入到与原有像素重叠区域的像素应为已知信息约束下的插值,约束插值操作为

$$\min_u \iint_{\hat{\Omega}} |\nabla u| \quad \text{s. t.} \quad u|_{\partial\hat{\Omega}} = \hat{u} - g|_{\partial\hat{\Omega}} \quad (16)$$

其中, $\hat{\Omega}$ 为图像模块中重叠的区域, \hat{u} 为已插入的像素值, g 为新生成的图像模块中的像素值, u 用于控制插值过程,式(16)操作的目的是使重叠区域两个模块间插值信息的散度算子结果最小。这种 TV 空间下的操作,在平滑图像的同时仍可以保持边缘特征。

每执行一次模块匹配都要对重叠区域进行散度约束的 TV 插值,以保证重叠区域与相邻像素的融合。无缝效应处理后,修复图像中的颜色强度变化及纹理特征间的接缝就不可见。

4 模型相似度函数的扩展

由于本文提出的 PDE 约束的基于模块的修复模型,由于是根据待修复目标区域邻域内像素值判断修复顺序及填入的模块,所以目标区域的选择对最终结果影响很大,且现有的修复技术都依赖于人工来选定目标区域^[1-4,7-10,13,14]。当目标区域为纯纹理图像时,可以通过扩展相似度函数的方式来减小区域轮廓对最终结果的影响,以使得修复结果为指定的纹理特征。扩展后的相似度函数为

$$\hat{d}(\hat{\Psi}_p, \Psi_q) = \sum_{p_1 \in \hat{\Psi}_p, p_2 \in \Psi_q} D(p_1) \cdot d(p_1, p_2) + \sum_{p_1 \in \hat{\Psi}_p, p_3 \in \tilde{\Psi}_q} \tilde{D}(p_1) \cdot \tilde{d}(p_1, p_3) \quad (17)$$

$$\tilde{\Psi}_q = \arg \min_{\tilde{\Psi}_q} \hat{d}(\hat{\Psi}_p, \Psi_q)$$

其中, $\tilde{\Psi}_q$ 为选定的与目标区域最相似的模块, p_3 表示其中的像素点, $\tilde{d}(p_1, p_3)$ 表示待修复模块与指定图像模块中像素间距离, $\tilde{D}(p_1)$ 表示指定模块中像素点切向等照度线强度, $\hat{d}(\hat{\Psi}_p, \Psi_q)$ 表示模块间距。扩展后的相似度函数距离公式由 $D(p_1)$ 及 $\tilde{D}(p_1)$ 约束,可见线性特征像素对相似度结果影响大。

由扩展后的相似度函数可知,待修复的目标模块与指定纹理图像中的模块相似时,距离函数的值较小,即相似度较大。在扩展后的相似度函数控制下,目标区域被修复为指定的纹理特征,而且即使目标区域选取不严格,也不会出现错误的修复结果。

5 数值差分格式

PDE 的处理结果依赖于所选用的差分格式。

本文模型中的约束项是散度算子的扩散结果,为此需分析散度算子的不同差分格式对修复结果的影响。数据项 $D(p)$ 可写成以下散度扩散算子:

$$D(p) = |u_x| = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) \quad (18)$$

并首先将散度算子做中心差分:

$$\nabla \cdot v = \frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial v_2}{\partial y}, v_1 = \frac{u_x}{|\nabla u|}, v_2 = \frac{u_y}{|\nabla u|} \quad (19)$$

其中, u_x, u_y 分别表示 u 的 x, y 方向的一阶导数。以图 2 中的东方向为例。 $u_x, u_y, \nabla u$ 在点 P_e 继续做中心差分

$$\begin{aligned} v_{P_e}^{(1)} &= \frac{1}{|\nabla u_{P_e}|} \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{P_e} \\ &\approx \frac{1}{|\nabla u_{P_e}|} \frac{u_X - u_O}{h} \\ &= \frac{u_X - u_O}{\sqrt{(u_X - u_O)^2 + (u_{P_{NE}} - u_{P_{SE}})^2}} \quad (20) \end{aligned}$$

其中, u_X, u_O 等分别表示点 X, O 像素的灰度值。

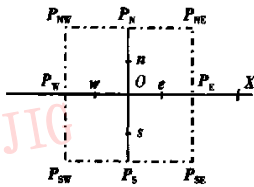


图 2 半点差分像素结构
Fig. 2 Half-point differential structure

式(20)中使用点 X 的值来判断点 O 的扩散情况,由于该操作超出图像处理的像素邻域范围^[8],因此对图 2 中所示点 e 做半点差分:

$$\begin{aligned} v_e^{(1)} &= \frac{1}{|\nabla u_e|} \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_e \\ &\approx \frac{1}{|\nabla u_e|} \frac{u_{P_E} - u_O}{h} \\ &= \frac{u_{P_E} - u_O}{\sqrt{(u_{P_E} - u_O)^2 + (u_{P_{NE}} - u_{P_{SE}})^2}} \quad (21) \end{aligned}$$

对虚拟点 e 的差分,可使得图像处理为像素点的 9 邻域。图 3 为中心差分格式与半点差分格式结果的比较,图 3(b)中,一些纹理被不合理地修复到了目标区域中,这是由于像素匹配区域过大而造成的结果。而图 3(c)则修复效果较好。由此可见,本文修复模型散度算子的数值实现应采用半点差分格式。



(a) 原始图像 (b) 中心差分结果 (c) 半点差分结果

图 3 本文模型使用不同差分格式的修复结果

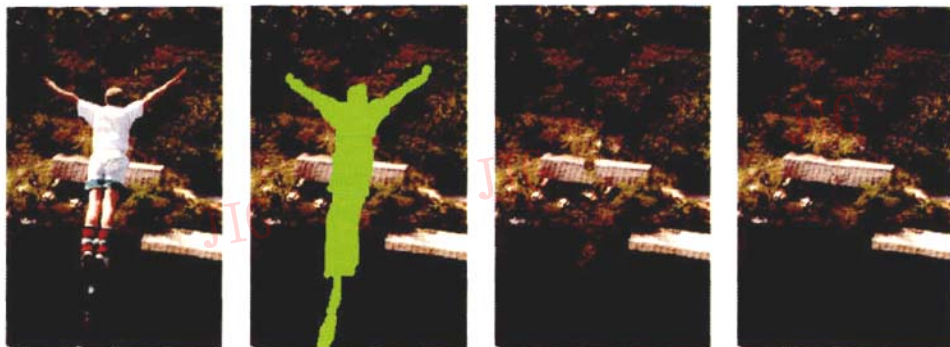
Fig. 3 Exemplar-based image inpainting with different differential structures

6 实验

为验证模型的修复效果,采用 PDE 约束的基于模块的模型对不同图像进行了修复实验。对于图 4 中的人为待修复的目标区域,由于 PDE 模型不能保持图像纹理,因此无法修复该图像^[1-3]。图 4(c)为 Criminisi 模型的处理结果,该图保存了树木、屋顶和水面的纹理,但屋顶被部分修复为树木的纹理,人的腿部被修复为岸边的纹理而不是水面。图 4(d)为本文提出模型的处理结果,图中不但保持了图像纹理,而且能完全保持屋顶位置的线性特征和岸边的轮廓。虽然图像修复算法没有确定的定量分析标准,但可以看出,图 4(d)的修复结果优于图 4(c),依照人眼视觉系统的辨识,岸边不会突然向水面突出,修复的屋顶也不应有树木的纹理特征。

图 5、图 6 是基于模块修复模型处理的图像与无缝衔接效应处理后图像的对比。图 5(a)为选定待修复目标区域的图像,图 5(b)为基于模块模型的修复结果,图 5(c)为使用散度约束下重叠区域无缝衔接效应处理后的修复结果。图 5(b)中目标区域内部存在明显可辨识的修复图像块,不仅白色的云朵呈块状填入到目标区域中,且颜色不均匀,而且区域左侧接缝效应严重,云朵位置存在明显的线性特征;图 5(c)中无可辨识的图像块显示了无缝衔接效应,修复效果好。图 6 中待修复的目标区域为飞机,图 6(e)为一般模型的修复结果,图 6(d)为无缝衔接效应处理的结果。图 6(d)中目标区域边缘为去接缝效应操作后的结果,其比图 6(c)中的图像平滑。图 6(c)中存在多处接缝轮廓,飞机存在的原始位置边缘非常清晰,修复效果不好。

图 7、图 8 为扩展的相似度函数作用下的修复



(a) 原始图像 (b) 选定目标区域的图像 (c) Criminisi 模型的修复结果 (d) 本文模型的修复结果

图 4 PDE 约束修复优先级的基于模块的图像修复

Fig.4 Exemplar-based image inpainting with PDE constrained filling procedure



(a) 选定目标区域的图像 (b) 基于模块模型的修复结果 (c) 无缝效应模型的修复结果

图 5 PDE 约束的无缝效应模型的图像修复

Fig.5 Seamless image inpainting with PDE constrain

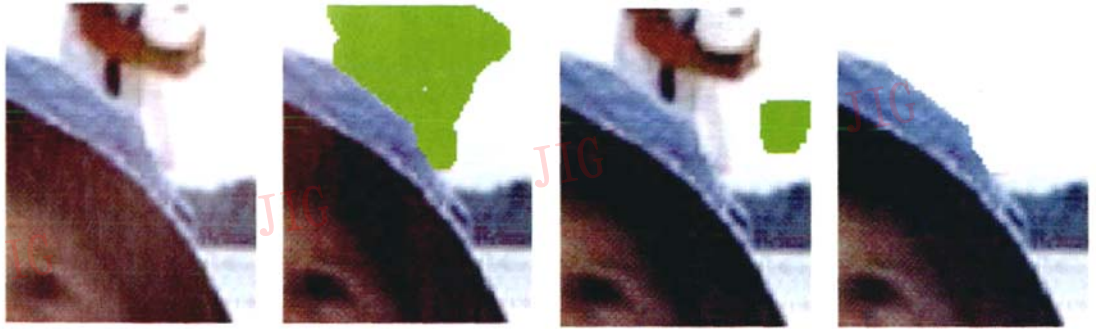


(a) 原始图像 (b) 选定目标区域的图像

(c) 基于模块的模型的修复结果 (d) 无缝效应模型的修复结果

图 6 PDE 约束的无缝效应模型的图像修复

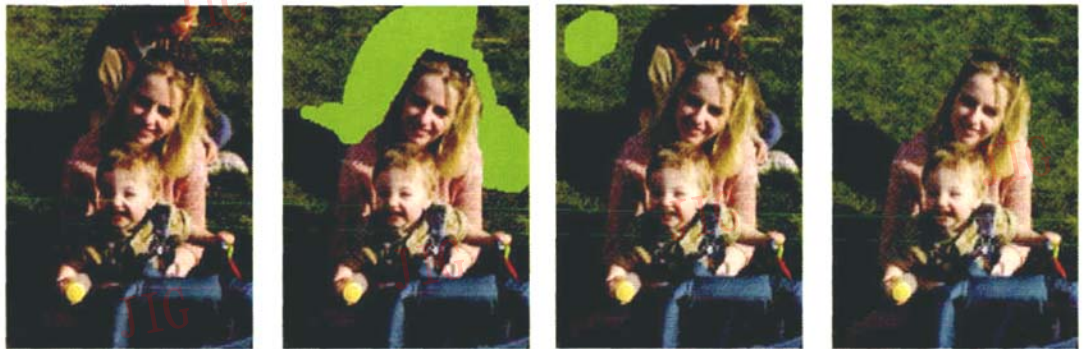
Fig.6 Seamless image inpainting with PDE constrain



(a) 原始图像 (b) 选定的目标区域图像 (c) 选定的指定纹理区域 (d) 本文的扩展相似度函数模型的处理结果

图 7 扩展相似度函数模型的图像修复

Fig.7 Image inpainting with PDE constrained similarity function



(a) 原始图像 (b) 选定的目标区域图像 (c) 选定的指定纹理区域 (d) 本文的扩展相似度函数模型的处理结果

图 8 扩展相似度函数模型的图像修复

Fig.8 Image inpainting with PDE constrained similarity function

结果。图 7(b)、图 8(b)中目标区域的选取都不严格,图 7(c)、图 8(c)中给出参照的纹理结构。由于目标区域为单一纹理图像,虽然目标区域不严格,但沿线性结构没有出现错误修复,即待修复的目标区域全部被修复为指定的纹理结构,可见图 7(d)、图 8(d)的修复结果很好。

7 结 论

本文提出了一种 PDE 与基于模块模型相结合的图像修复模型,该模型不是两种方法的简单组合,而是将 PDE 作为约束嵌入到基于模块的模型中,它是由图像的几何特征控制修复过程。本文使用像素切向等照度线强度约束修复顺序以及相似度函数,以使得图像中沿线性特征位置的像素具有较高的修

复优先级,由于其在相似度函数中具有较大影响,因此修复结果在保持纹理信息的同时,可保留线性特征。针对基于模块修复模型带来的模块接缝效应明显的问题,本文对修复结果进行了去接缝效应处理,而对于由修复顺序引起的模块无序重叠问题,本文则使用散度约束下 TV 空间插值操作来得到重叠区域共同影响下的去接缝效应处理结果。

本文最后对相似度函数加以扩展,使得目标区域可被修复为指定的纹理特征。这种扩展也可以应用在图像纹理结构转化中,这将在今后的工作中加以分析。

参考文献 (References)

1 Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V, et al. Image inpainting[A]. In: Proceedings of Computer Graphics, Annual Conference Series, ACM

- SIGGRAPH[C]. New Orleans, Louisiana, USA, 2000; 417 ~ 424.
- 2 Chan T F, Shen J. Non-texture inpainting by curvature-driven diffusions(CDD)[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2001, 12(4): 436 ~ 449.
 - 3 Chan T F, Kang S, Shen J. Euler's elastica and curvature based inpainting [J]. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 2002, 63(2): 564 ~ 592.
 - 4 Efros A A, Freeman W F. Image quilting for texture synthesis and transfer [A]. In: *Proceedings of Computer Graphics, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH[C]*. Los Angeles, CA, USA, 2001; 341 ~ 346.
 - 5 Chan T F, Shen J. Morphologically invariant PDE inpainting [R]. University of California Los Angeles(UCLA) CAM Report 01-15, Los Angeles CA, USA, 2001.
 - 6 Bernard R, Lecom E, Laborelli L, et al. Missing data correction in still images and image sequences [A]. In: *Proceedings of ACM Multimedia[C]*, Juan-les-Pins, France, 2002; 355 ~ 361.
 - 7 Efros A A, Leung T. Texture synthesis by nonparametric sampling [A]. In: *Proceedings of International Conference on Computer Vision[C]*, Kerkyra, Greece, 1999; 1033 ~ 1038.
 - 8 Chan T F, Osher S, Shen J. The digital TV filter and nonlinear denoising [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(2): 231 ~ 241.
 - 9 Criminisi A, Perez P, Toyama K. Object removal by exemplar-based inpainting [A]. In: *Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]*, Madison, Wisconsin, USA, 2003; 721 ~ 728.
 - 10 Criminisi A, Perez P, Toyama K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(9): 1200 ~ 1212.
 - 11 Harrison P. A non-hierarchical procedure for re-synthesis of complex textures [A]. In: *Proceedings of International Conference in Central Europe Computer Graphics and Visualization (WSCG 2001) [C]*, Plzen, Czech Republic, 2001; 190 ~ 197.
 - 12 Drori I, Cohen-Or D, Yeshurun H. Fragment-based image completion [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3): 303 ~ 312.
 - 13 Bertalmio M, Vesè L, Sapiro G, et al. Simultaneous structure and texture image inpainting [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003, 12(8): 882 ~ 889.
 - 14 Liang L, Liu C, Xu Y Q, et al. Real-time texture synthesis by patch-based sampling [R]. Technical Report MSR-TR-2001-40, Beijing: Microsoft Research of Asia, 2001.