

基于运动受限弹簧质子模型的图像上采样

龚永义^{1),4)} 罗笑南^{2),3),4)}

¹⁾(广东外语外贸大学信息学院 广州 510006)

²⁾(中山大学信息科学与技术学院 广州 510006)

³⁾(教育部数字家庭重点实验室(中山大学) 广州 510006)

⁴⁾(国家数字家庭工程技术研究中心 广州 510006)

摘 要 图像上采样是可视媒体技术的重要组成部分. 作者提出一种新的方法, 将图像上采样问题转换成基于运动受限弹簧质子模型的力学平衡和基于变形网格的上采样问题. 首先, 根据图像放大的特点, 作者调整传统弹簧质子模型中拉伸/排斥力的传统方法定义方式, 避免质子对邻域外其它质子的运动产生拉伸干扰; 设计向心力, 限制质子活动区域; 基于源图像梯度场模的梯度场定义模型外力, 使所有边缘质子所受外力垂直指向图像边缘方向, 非边缘质子所受外力几乎为零; 基于 Helmholtz-Hodge 定理引进光滑正则项, 保证变形的光滑性. 然后, 通过弹簧质子模型确定图元控制区域网格, 并基于该网格实现上采样. 作者提供了若干实验数据说明方法是有意义的.

关键词 图像上采样; 运动受限弹簧质子模型; 图元控制区域

中图法分类号 TP391 DOI号: 10.3724/SP.J.1016.2011.01621

Image Upsampling Based on Moving-Constrained Spring-Mass Model

GONG Yong-Yi^{1),4)} LUO Xiao-Nan^{2),3),4)}

¹⁾(Cisco School of Informatics, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou 510006)

²⁾(School of Information Science & Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006)

³⁾(Key Laboratory of Digital Life (Sun Yat-sen University), Ministry of Education, Guangzhou 510006)

⁴⁾(National Engineering Research Center of Digital Life, Guangzhou 510006)

Abstract Image upsampling is an important area in visual media technologies. In this paper the authors propose a new method for upsampling images by considering the image upsampling as the problems of mechanics balance based on moving-constrained spring-mass model and upsampling based on deformed grid. According to the characters of image upsampling, the authors modify the classical definition of stretching force in spring-mass model to reduce the stretch disturbing on those masses outside the neighborhood of the mass from the mass's moving. A centripetal force is also introduced to restrict the mass's moving scope. The external force is designed based on the gradient field of the module of the gradient of source image, which will point to the direction of edges for masses in the neighbor of edge, and will nearly be zero for the other masses. Also, a regular term based on Helmholtz-Hodge theory is used to guarantee the smoothness of grid deformation. The authors offer a series of experimental results to show the usefulness of the method.

Keywords image upsampling; moving-constrained spring-mass model; cell control region

1 引 言

图像上采样,又称为图像放大,是一种将低分辨率图像转换成高分辨率图像的图像处理技术,是可视媒体技术的重要组成部分.近 10 年,随着高清设备、网络电视、3G 手机等可视媒体的普及,图像上采样研究再次成为热点,在最近几年的 ACM Siggraph、CVPR 等学术会议有专题讨论^[1-4].

图像上采样可以描述为插值问题:如何在新的位置插入合适的图像信息,属于典型的病态问题,需要额外加入适当的限制条件,如放大的图像尽可能保持原有图像的梯度特性,才能解决.

图像上采样的研究成果大致可以归为 3 类^[1-27]:

(1) 基于插值(核函数)的图像上采样算法.特点是:假设图像数据是空间光滑,带宽有限,通过设计有限大小的插值核函数近似 sinc 函数,进行插值计算,算法实现简单,速度快,当图像光滑时效果很好;缺点是没考虑图像边缘特定局部信息,放大图像尖锐特征模糊化,细节缺失.

(2) 基于重建的上采样算法.这类算法是目前热点研究方向,特点是依据先验图像特征知识及原始图像必须与放大图像的下采样相似限制等,重建图像.这类算法放大图像效果相对较好,但算法复杂,速度有待进一步提高.

(3) 基于学习的上采样算法.这类算法强调高、低分辨率图像之间的关联,通过学习训练,归纳高、低分辨率图像对之间的规律,进行图像上采样.算法的效果与训练集高、低频数据的相似性及数量密切相关,通常算法复杂.

Nearest-Neighbor 插值、Bilinear 插值、Bicubic 插值等是经典的基于插值(核函数)图像上采样算法^[5].为减少信息丢失,Unser 等人^[6]提出任意采样步长的最小二乘多项式样条重采样算法,实现任意比率的图像上采样. Marsi 和 Carrato 等人^[7]依据图像的局部亮度差调整线性插值的参数,得到更强的图像对比度. Su 和 Willis^[8]根据图像数据,局部调整插值权,减少放大图像的模糊度和其它缺陷. Cha 和 Kim^[9]提出 EASE 算法,在插值误差(余项)定理的基础上,依据图像的边缘特性,通过弥补误差的方法,改进双线性插值图像上采样算法.

研究人员近几年提出的算法,多数可以归属于第(2)、(3)类方法,它们的共同特点是上采样效果较好,但算法复杂.

Atkins 等人^[10]将聚类方法用于图像上采样研究,将图像像素按边、光滑区域等排序,在线性插值的基础上建立决策树,采用基于树的分类方法实现图像上采样. Battiato 等人^[11]提出的 LAZA 算法,采用线性插值放大图像,建立简单规则和可调整阈值检测边缘,并更新放大图像;之后 Battiato 等人^[12]提出 SIAD 算法,引入各项异性扩散函数锐化图像边缘. Hertzmann 等人^[13]提出广义图像类推框架(image analogies),通过范例图像推理出图像详细结构. Freeman 等人^[14]在此基础上,提出了基于范例(example-based)的图像上采样算法; Tappen 等人^[15-16]则根据范例集,训练一簇线性插值算子,用于计算高分辨率图像中的可能图像块;然后采用类似 belief-propagation 策略,为低分辨率中的每个像素,选择合适的高分辨率图像块.

基于学习的上采样在图像上采样研究中也流行. Kopf 等人^[1]提出解(solution)上采样算法,首先从低分辨率图像计算解,然后采用 joint bilateral filtering 进行上采样. Avidan 和 Shamir^[2]提出 content-aware 图像上采样算法,通过在切割开的裂缝之间插入或删除不太重要的像素,调整图像大小. Li 等人^[17]提出的 NEDI 算法基于低分辨率图像的协方差估计高分辨率图像的协方差. Sun 等人^[4]引入 gradient profile 描述图像的边缘几何特性,通过学习得到高、低分辨率之间的 gradient profiles 统计分布关系,实现图像上采样. Fattal^[3]则分析不同分辨率图像边的依赖统计特性,以此为先验知识,用于重建因图像上采样而丢失的高频信息.也有研究人员建立高低分辨率联系的非参数集,依此向被插值图像添加高频块,但这种方法虽能增强放大图像的锐利度,却引进了不规则信息.为此, Aly 和 Dubois^[18-19]采用全变分方法进行图像上采样,消除不规则信息.

总体而言,虽然第(2)、(3)类算法效果较好,但通常算法比较复杂,并不适合在资源受限设备,如手机等移动设备上运行.因此设计符合受限情形的上采样算法是有必要的.

本文给出基于运动受限弹簧质子模型的图像上采样算法,算法由基于运动受限弹簧质子模型的网格变形预处理和基于变形网格的上采样二步骤组成.首先我们基于图像生成弹簧质子网格,通过网格变形,令图像边缘附近的网格质子向边缘靠近,非边缘质子尽可能不移动,然后在变形网格的基础上,实现图像上采样.其中网格变形预处理可以预先在高端机器上运行,而基于变形网格的上采样可在受限

设备上运行。

本文第 2 节首先说明网格变形用于图像上采样的原理,然后给出基于图像特性的运动受限弹簧质子网格模型;第 3 节给出基于变形网格的上采样算法;第 4 节给出适当示例,讨论算法的有效性,分析算法的优缺点;第 5 节是结论。

2 基于弹簧质子模型的网格变形

评价图像上采样算法优劣的一个常用标准是上采样图像保持源图像图像特性的程度,其中梯度特性是较多采用的图像特性. 本文我们给出基于运动受限弹簧质子网格变形的上采样算法,实现保梯度特性的图像上采样。

为方便描述,我们称由位于相邻两行两列上的 4 个图像像素顺时针连接所围的区域为图像的一个图元(cell),上述像素称为图元的端点(如图 1(a)). 显然,源图像上采样所得新像素必落于源图像图元中,新像素的取值依赖于其所在图元的图像特性. 图元与图像区域的关系可归纳为 3 类情形(如图 1(b)):图元处于源图像区域内部并远离区域边缘;图元处于源图像区域内部但位于区域边缘;图元处于区域边缘。

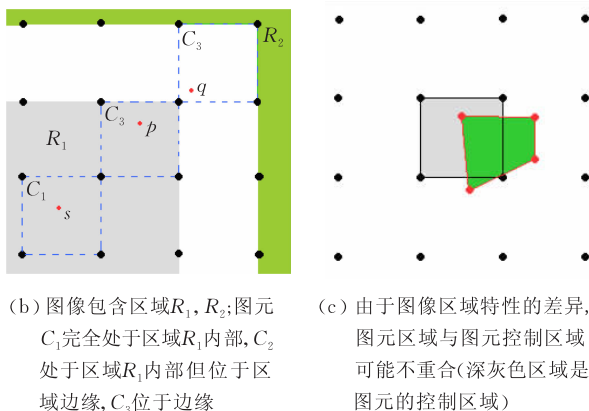
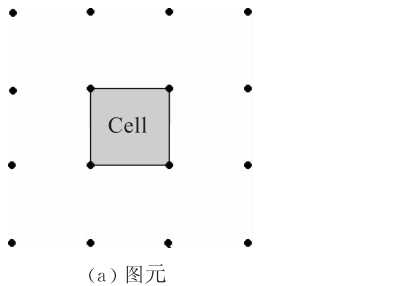


图 1 图元与图元控制区域

对于第 1 类情形,图元区域内所有像素拥有相似的图像特性,它们之间可以用一种简单的函数关

系,如双线性函数近似,将图元区域内的像素取值近似成以图元端点为插值点的函数表示. 对于第 2 类情形,由于图像区域特性的延伸性,在上采样时,我们认为图像的区域特性不会因为图元位于边界而停止,更合理的是它会“漫过”现有边界,涌入与该图元紧邻的图元区域,从而这片被“漫过”的区域应拥有与该图元类似的图像特性,我们可以采用类似第 1 类情形的方式计算图元区域和漫过区域中新像素的值. 对于第 3 类情形,图元位于边缘,根据第 2 类情形知道,图元的部分区域已被其它图元“漫过”,只有剩余区域的特性可以由该图元刻画. 为方便描述,我们将上述三类情形中,可以依赖图元端点进行像素值计算的区域称为图元的控制区域,用于描述该区域内新像素间函数关系的函数称为图元控制函数。

归纳上文分析可以知道,图元控制区域具备如下特点(如图 2,图 6(b)):第 1 类情形的图元控制区域就是图元区域本身,第 2 类情形的图元控制区域是在图元区域基础上向边缘方向的延伸,第 3 类情形的图元控制区域是图元区域向边缘方向的收缩。

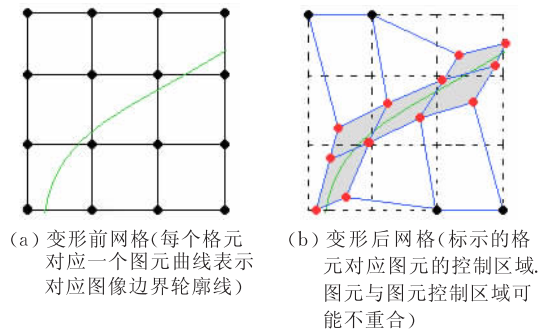


图 2 弹簧质子模型网格及网格变形

从图元控制区域角度分析,经典比例 bilinear 插值上采样算法假定图元控制函数是双线性插值函数,图元控制区域就是图元区域本身,从而忽略不同区域图元控制区域的差异,从而导致上采样效果不佳. 因此,给出合适的图元控制区域,有助于提高上采样效果. 本文我们采用基于运动受限弹簧质子模型的网格变形来定位图元控制区域。

我们沿用文献[28]中的方法定义弹簧质子模型. 假设源图像 I_0 定义在域 $\Omega \subset R^2$ 上. 源图像中像素对应模型中质子,相邻像素间横纵联系由模型中对应质子间的无质量弹簧模拟. 模型变形是关于时间的过程,即变换 $h(x)$ 是关于时间的函数: $h(x, t) = x + u(x, t)$ 表示 t 时刻质子 x 的坐标,质子运动轨迹满足:

$$m \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = F_{\text{int}}(x, t) + F_{\text{ext}}(x, t),$$

模型的关键是内力 F_{int} 、外力 F_{ext} 的定义。

2.1 内力定义

弹簧质子模型的变形主要体现为三种现象: 拉伸、剪切和弯曲。可以通过三类弹性力来模拟: 拉伸/排斥力 F_{stretch} 、弯曲力 F_{bending} 和剪切力 F_{shear} 。为防止质子运动过度振荡, 引入阻尼力 F_{damping} 。上述四类力组成传统内力^[28],

$$F_{\text{int}} = F_{\text{stretch}} + F_{\text{bending}} + F_{\text{shear}} + F_{\text{damping}}.$$

对于基于 2D 图像建立的弹簧质子模型, 由于图像不可能向第三维空间发生弯曲变形, 因此不考虑弯曲力, 为简单起见, 不考虑剪切力^[28]。

我们假设模型中弹簧符合 Hooke 定律, 上述弹性力定义如下。

2.1.1 拉伸/排斥力

拉伸/排斥力因弹簧拉伸或压缩变形而产生。网格变形的目的是定位图元控制区域, 质子运动模拟对应像素因所在图元区域特性所产生的偏移。根据图像上采样特点, 质子间的相互影响与它们之间的距离成反比, 因质子偏移而产生的弹簧拉伸不应对其邻域内的其它质子产生过分的拉伸影响, 避免其它质子的不恰当偏移, 造成相关图元区域特性的虚假延伸, 而得到虚假的图元控制区域, 因此, 我们需要对拉伸/排斥力作适当调整, 限制拉伸力, 确保它的拉伸影响仅局限于质子的邻域内, 而不至于向外传播。本文我们采取的措施是直接取消弹簧的拉力。 t 时刻质子 x 所受的拉伸/排斥力定义为

$$F_{\text{stretch}}(x, t) = \sum_{y \in N(x)} \left[-k(x, y) \cdot \frac{y-x}{\|y-x\|} \cdot A(x, y) \right],$$

$$A(x, y) = \begin{cases} \|y-x\| - l(x, y), & \|y-x\| < l(x, y) \\ 0, & \|y-x\| \geq l(x, y) \end{cases},$$

其中质子 $x \in \Omega'$, $N(x)$ 是 x 的邻域质子集, $k(x, y)$ 是弹簧 xy 的弹性系数。 $l(x, y)$ 表示弹簧质子模型在初始稳定状态时, 弹簧 xy 的自由长度^[28]。

2.1.2 阻尼力

阻尼力的特点是: 速度越大, 阻力越大。 t 时刻质子 x 所受阻尼力定义如下,

$$F_{\text{damping}}(x, t) = -k_m(x) \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial t},$$

其中 $k_m(x)$ 是阻尼系数, $u(x, t)$ 是质子 x 的偏移量。

2.1.3 运动受限

图像上采样中一个很大的特点是每个像素的影响范围有限, 不应超过它所在的 4 个图元区域, 因

此, 与之对应的质子的运动偏移也应当在相应的网格区域内。为此, 我们特别设计向心力, 限制质子的运动。向心力具备如下特点: 当质子一旦偏离指定区域时, 向心力会变大, 否则向心力很小或为零。为简单起见, 我们将质子的运动区域限制在以质子 x 初始位置为中心, 以与质子 x 相连弹簧的最短自由长度 l 为半径的区域内。 t 时刻质子 x 所受向心力定义为

$$F_{\text{cent}}(x, t) = -k_{\text{cent}}(x) \cdot \frac{u(x, t) - x}{\|u(x, t) - x\|} \cdot \left(\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + 1 \right) \cdot d(x, t),$$

$$d(x, t) = \begin{cases} \|u(x, t) - x\| - l, & \|u(x, t) - x\| - l > 0 \\ 0, & \|u(x, t) - x\| - l \leq 0 \end{cases}.$$

为方便起见, 我们将向心力归为内力, 从而, t 时刻质子 x 所受的内力为

$$F_{\text{int}} = F_{\text{stretch}} + F_{\text{damping}} + F_{\text{cent}}.$$

2.2 外力定义

外力定义是模型的关键。根据图元控制区域的特点, 我们要求外力的作用是引导边缘质子向边缘运动, 非边缘质子尽可能不运动, 由于我们已取消拉伸力, 因此, 外力应具备如下特点: 边缘点所受外力应垂直指向边缘并且较大, 非边缘点所受外力尽可能小或为零。

Xu 等人^[29]定义的梯度向量流可以保证边缘像素的梯度向量流垂直指向边缘, 但非边缘像素的梯度向量流也指向边缘且较大, 因此, 若基于梯度向量流定义外力, 会导致非边缘质子发生较大的偏移, 使得图元控制区域定位错误。分析图像梯度场模的梯度场(图 3), 图像边缘像素的梯度场模的梯度垂直指向边缘, 且它的模比较大, 其它区域像素的梯度场模梯度的模相对比较小, 几乎为零, 基本符合我们对外力的要求。因此我们在图像梯度场模梯度场的基础上定义外力。简单而言, 可以直接将 t 时刻质子 x 所受外力定义为 $F_{\text{ext}}(x, t) = \nabla \| \nabla I_0 \|_x$ 。

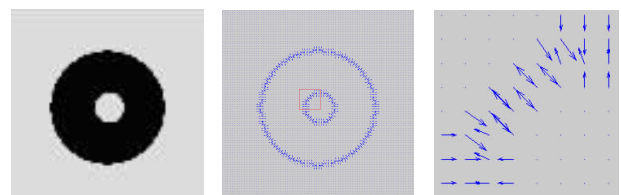


图 3 图像梯度场模的梯度场

图 3 图像梯度场模的梯度场

为避免变异的网格变形, 如网格相交错位, 尖角, 极不规则网格等, 我们为模型网格变形引入光滑

性限制. 根据 Helmholtz-Hodge 定理, 光滑变形场可以分解成两部分: 散度无关 (divergence-free) 项和旋度无关 (curl-free) 项. 散度用于度量变形场的流量, 旋度与变形场中的旋转有关. 尽可能减少变形场的散度和旋度, 可以保证变形场的光滑性. 为此, 我们引入能量函数

$$E(u(x, t)) :=$$

$$\frac{\alpha}{2} \iint_{\Omega} \left(\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial x_2} \right)^2 \right) dx,$$

其中 $u(x, t) = (f(x, t), g(x, t))$, $x = (x_1, x_2)$, α 是权系数. 根据散度和旋度定义, 能量函数 $E(u)$ 的最小化, 可以使得变形场的散度和旋度为零. 在变分法框架下, 能量函数最小化的必要条件是

$$\alpha \Delta f = 0, \quad \alpha \Delta g = 0,$$

其中 Δ 是 Laplace 算子. 由此, 我们将外力修正为

$$F_{\text{ext}}(x, t) = \nabla \|\nabla I_0\|_x + \alpha \begin{pmatrix} \Delta f \\ \Delta g \end{pmatrix}.$$

对于网格变形中可能出现的拓扑保形问题, 我们直接采用文献[28]中提供的策略.

3 基于变形网格的上采样

通过基于运动受限弹簧质子模型的网格变形, 我们得到源图像所有图元的控制区域. 下面将在图元控制区域网格的基础上实现上采样. 首先我们计算每个图元控制区域端点处点的像素值, 然后运用双线性插值计算图元控制区域内的上采样像素的值.

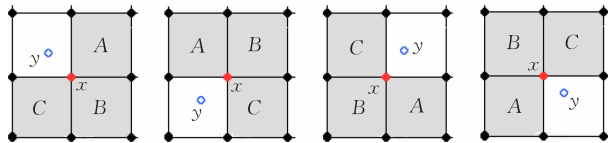


图 4 运动受限弹簧质子模型稳定后质子可能的 4 种情形 (假设质子 x 运动到空心点 y 处, 从图像特性的区域延伸性分析, 灰色图元对空心点处图像特性影响最大)

当模型网格变形稳定后, 质子的新位置必定是如图 4 所示的 4 种情形之一. 假设质子 x 运动到空心点 y 处, 则存在在以 y 为端点且包含质子 x 的图元控制区域, 从图像特性的区域延伸性分析, 该控制区域所对应的图元对 y 影响最大, 我们采用基于该图元的双线性外插值计算 y 处的值, 得到控制区域端点 y 处的像素值 $V(y)$.

为计算图元控制区域内上采样像素的值, 我们用仿射变换近似图元到图元控制区域的变形变换.

设图元 A 的 4 个端点为 $(x_{1_1}, x_{1_2}), (x_{2_1}, x_{2_2}), (x_{3_1}, x_{3_2}), (x_{4_1}, x_{4_2})$, 对应控制区域端点为 $(y_{1_1}, y_{1_2}), (y_{2_1}, y_{2_2}), (y_{3_1}, y_{3_2}), (y_{4_1}, y_{4_2})$, 它们之间的变形变换用仿射变换近似,

$$\begin{cases} x_1 = a_{11}y_1 + a_{12}y_2 + a_{13} \\ x_2 = a_{21}y_1 + a_{22}y_2 + a_{23} \end{cases},$$

其中 $y = (y_1, y_2)$ 是图元 A 控制区域内任一点, $x = (x_1, x_2)$ 是在仿射变换假设下点 y 在图元 A 中的对应点 (图 5). 在保拓扑的前提下^[28], 我们将图元控制区域划分成两个三角区域, 相应图元区域也划分成两个三角区域, 由此将图元控制区域与图元区域之间的仿射变换, 用两组三角区域之间的仿射变换近似.

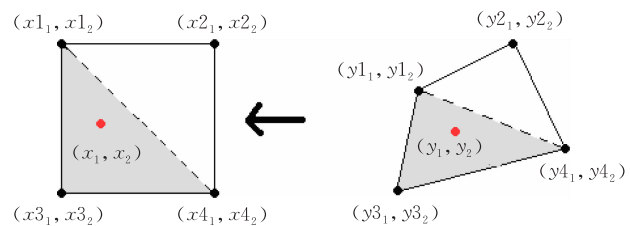


图 5 用仿射变换近似图元 A 与它的图元控制区域之间的变形变换 (左图是图元 A 区域, 右图是对应的图元控制区域)

以图 5 图元控制区域中灰色三角区域与图元中对应灰色三角区域之间的仿射变换为例, 我们可以确定仿射变换系数如下:

$$\begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{1_1} & y_{1_2} & 1 \\ y_{4_1} & y_{4_2} & 1 \\ y_{3_1} & y_{3_2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_{1_1} \\ x_{4_1} \\ x_{3_1} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{1_1} & y_{1_2} & 1 \\ y_{4_1} & y_{4_2} & 1 \\ y_{3_1} & y_{3_2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_{1_2} \\ x_{4_2} \\ x_{3_2} \end{bmatrix}.$$

从而得到 $y = (y_1, y_2)$ 的对应点 $x = (x_1, x_2)$, 然后我们按下式计算 $y = (y_1, y_2)$ 处像素的值 $V(y)$,

$$\begin{aligned} V(y_1, y_2) = & (x_{4_1} - x_{1_1})(x_{4_2} - x_{1_2})V(y_{1_1}, y_{1_2}) + \\ & (x_{1_1} - x_{3_1})(x_{3_2} - x_{2_2})V(y_{2_1}, y_{2_2}) + \\ & (x_{2_1} - x_{1_1})(x_{2_2} - x_{2_2})V(y_{3_1}, y_{3_2}) + \\ & (x_{1_1} - x_{1_1})(x_{2_2} - x_{1_2})V(y_{4_1}, y_{4_2}). \end{aligned}$$

我们将基于运动受限弹簧质子模型的图像上采样算法归纳如下:

- (1) 基于图像生成弹簧质子模型网格;
- (2) 基于网格, 进行基于运动受限弹簧质子模型的网格变形, 获取每个图元的控制区域;
- (3) 依据给定的放大倍数, 基于变形网格 (图元控制区域) 进行上采样, 得到相应的上采样图像.

4 实验与讨论

本节我们给出若干实验数据,说明方法的有效性与不足. 我们的实验在配置为 Intel Core 双核 CPU T300 2.0 G, RAM 3 GB 的 IBM R61 机上进行. 所采用的操作系统是 Windows Vista, 所有实验用 Visual C++ 6.0 编写实现. 为简单起见, 假设所涉及弹簧质子模型中所有弹簧自由长度为 1, 弹性系数 $k=0.1$, 阻尼系数 $k_m=1.0$, 向心力系数 $k_{\text{cent}}=$

1.0, 光滑系数 $\alpha=0.2$, 时间步长 $\Delta t=0.4$. 由于我们在计算外力时, 对图像亮度值进行归一化处理, 因此时间步长可以比较大.

在图 6 中, 我们对所选图像区域放大 4×4 倍. 首先我们运用所提出的算法, 确定图像的图元控制区域网格(图 6(b)); 图 6(b)表明, 位于图像边缘的质子向边缘方向运动, 非边缘质子基本不动, 图元控制区域网格能较精确地定位图像边缘区域, 基于图元控制网格的上采样图像能较好地保留源图像区域的边缘信息(图 6(c)).

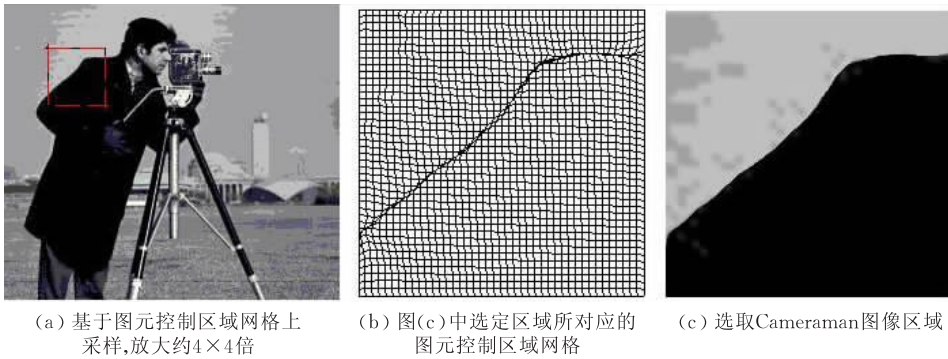


图 6 Cameraman 局部放大

在图 7 中, 我们分别对圆环图像和医学图像放大 4×4 倍, 结果表明我们的算法能较好地保持源图像的边缘锐度并保持适当的边缘光滑性, 而不会出现锯齿现象.

在图 8 中, 我们分别采用最近邻域法(Nest), Bicubic 插值算法^[5]、Li 等人^[17]的 Nedi 算法、Fattal^[3]的基于边缘统计上采样算法和我们的算法对 child 图像进行 4×4 倍的图像放大, 结果表明我们方法的放大效果清晰度比 Bicubic 插值算法和 Nedi 算法好, 逊于 Fattal 的算法. 但我们的算法的一个重要特点是可以分成相对的两个过程, 其中基于运动受限弹簧质子模型的图元控制区域定位只需运行一次, 一旦确定图元控制区域网格, 我们可以基于该网格对图像实施任意次任意倍数的快速放大处理, 且对环境要求不高, 可以在受限设备上运行.

在图 9 中, 用我们的方法对 flower 图像和 old man 图像分别进行 2×2 、 4×4 倍数的放大, 放大结果基本都能保持源图像的锐度.

我们也尝试采用 RMS^[4] 比较不同算法的上采样质量. 在表 1 中, 我们给出图 8 中 4 个上采样算法与我们方法(MCSM)的 RMS, 表 1 说明我们方法的 RMS 值优于 Nest、Nedi, 与 Fattal 相近, 同时, 表 1 显示 Bicubic 的 RMS 最优. 但从图 8 实际图像效果可

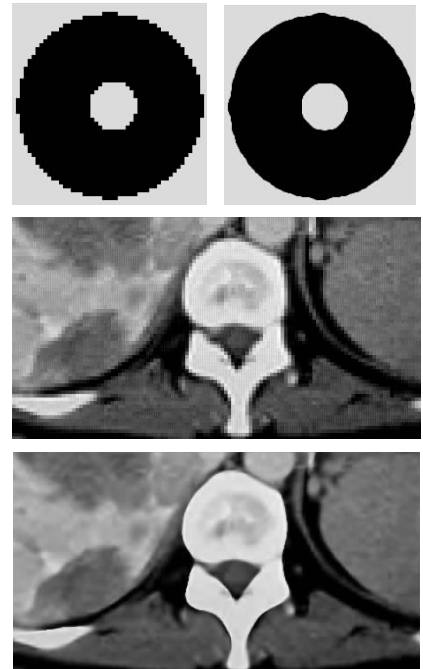


图 7 采用我们的算法放大 4×4 倍的图像(第 1 行左图采用最近邻域插值放大, 右图采用我们的算法; 第 2、3 行为医学图像上采样. 第 2 行采用最近邻域插值, 第 3 行采用我们的算法)

以看出, Fattal 等人的方法应当优于 Bicubic 算法. 因此, RMS 只能作为评价上采样算法质量的参考标准.

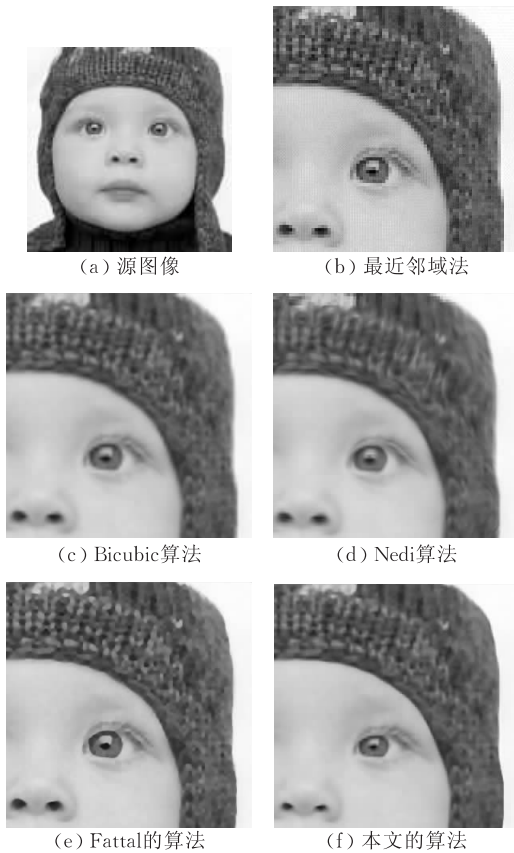


图 8 采用不同的上采样算法,对 128×128 的 child 图像放大 4×4 倍



图 9 采用我们的算法分别放大 2×2 、 4×4 倍

表 1 不同上采样方法 RMS 比较

	RMS				
	Nest	Bicubic	Nedi	Fattal	MCSM
child	45.37	32.26	47.75	33.69	33.58

尽管如此,我们的方法存在不足. 由于我们基于图像梯度场模梯度场定义弹簧质子外力,算法对梯度变化比较平缓的图像边缘区域放大效果有限,不

适用于对受噪音干扰图像的放大处理,模型对参数的选取影响放大效果等,这些是我们接下来尽快解决的问题.

5 结 论

本文中我们将图像上采样问题转换成基于运动受限弹簧质子模型的力学平衡和基于变形网格的上采样问题. 弹簧质子模型主要用于确定图元控制区域网格.

根据图像放大的特点,我们调整传统弹簧质子模型中拉伸/排斥力的传统方法定义方式,避免质子对邻域外其它质子的运动产生拉伸干扰;设计向心力,限制质子活动区域;我们基于源图像梯度场模的梯度场定义模型外力,使所有边缘质子所受外力垂直指向图像边缘方向,非边缘质子所受外力几乎为零;基于 Helmholtz-Hodge 定理引进光滑正则项,保证变形的光滑性. 然后,通过弹簧质子模型确定图元控制区域网格,并基于该网格实现上采样. 实验表明是有意义的.

由于基于梯度场定义弹簧质子模型外力,我们的方法对梯度变化比较平缓的图像边缘区域放大效果有限,不适用于对受噪音干扰图像的放大处理,对模型参数的选取影响放大效果等,这些是我们接下来尽快解决的问题.

参 考 文 献

- [1] Kopf J, Cohen M F, Lischinski D, Uyttendaele M. Joint bilateral upsampling. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 1-5
- [2] Avidan S, Shamir A. Seam carving for contentaware image resizing. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 10:1-10:9
- [3] Fattal R. Image upsampling via imposed edges statistics. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 95:1-95:8
- [4] Sun J, Sun J, Xu Z B, Shum H Y. Image super-resolution using gradient profile prior//*Proceedings of the CVPR*. Anchorage, Alaska, USA, 2008: 1-8
- [5] Keys R G. Cubic convolution interpolation for digital image processing. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1981, 29(6): 1153-1160
- [6] Unser M, Aldroubi A, Eden M. Enlargement or reduction of digital images with minimum loss of information. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, 4(3): 247-258
- [7] Marsi S, Carrato S, Ramponi G. VLSI implementation of a nonlinear image interpolation filter. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1996, 42(3): 721-728

- [8] Su D, Willis P. Image interpolation by pixel level data-dependent triangulation. *Computer Graphics Forum*, 2004, 23(2): 189-201
- [9] Cha Y, Kim S. The error-amended sharp edge (EASE) scheme for image zooming. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(6): 1496-1505
- [10] Atkins C B, Bouman C A, Allebach J P. Tree-based resolution synthesis//*Proceedings of the IEEE ICIP*. Savannah, Georgia, USA, 1999: 405-410
- [11] Battiato S, Gallo G, Stanco F. A locally-adaptive zooming algorithm for digital images. *Image Vision and Computing Journal*, 2002, 20(11): 805-812
- [12] Battiato S, Gallo G, Stanco F. Smart interpolation by anisotropic diffusion//*Proceedings of the 12th International Conference on Image Analysis and Processing*. Mantova, Italy, 2003: 572-577
- [13] Hertzmann A, Jacobs C E, Oliver N, Curless B, Salesin D. Image analogies//*Proceedings of the SIGGRAPH*. New York, NY, USA, 2001: 327-340
- [14] Freeman W T, Jones T R, Pasztor E C. Example-based super-resolution. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2002, 22(2): 56-65
- [15] Tappen M F, Russell B C, Freeman W T. Exploiting the sparse derivative prior for super-resolution and image demosaicing//*Proceedings of the International Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision*. Nice, France, 2003: 1-24
- [16] Tappen M F, Russell B C, Freeman W T. Efficient graphical models for processing images//*Proceedings of the CVPR*. Washington, DC, USA, 2004: 673-680
- [17] Li X, Orchard M T. New edge-directed interpolation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(10): 1521-1527
- [18] Aly Hussein H, Dubois Eric. Image up-sampling using total-variation regularization with a new observation model. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(10): 1647-1659
- [19] Aly Hussein H, Dubois Eric. Specification of the observation model for regularized image up-sampling. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(5): 567-576
- [20] Baker S, Kanade T. Limits on super-resolution and how to break them//*Proceedings of the CVPR*. Hilton Head Island, SC, USA, 2000: 2372-2379
- [21] Lukac R et al. Color image zooming on the Bayer pattern. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2005, 15(11): 1475-1492
- [22] Vazquez Carlos, Dubois Eric, Konrad Janusz. Reconstruction of nonuniformly sampled images in spline spaces. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(6): 713-725
- [23] Staelin C, Greig D, Fischer M, Maurer R. Neural network image scaling using spatial errors. HP Laboratories Israel, Technion City, Haifa, Israel; Technical Report HPL-2003-26(R.1), October 2003
- [24] Muresan D D, Parks T W. Adaptively quadratic (AQua) image interpolation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(5): 690-698
- [25] Candocia F M, Principe J C. Superresolution of images based on local correlations. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1999, 10(2): 372-380
- [26] Freeman W T, Pasztor E C. Markov networks for super-resolution//*Proceedings of the 34th Annual Conference on Information Sciences and Systems*. Baltimore, USA, 2000: 1-6
- [27] Dodgson N A. Quadratic interpolation for image resampling. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(9): 1322-1326
- [28] Gong Yong-Yi, Luo Xiao-Nan et al. Medical image registration based on modified spring-mass model. *Chinese Journal of Computers*, 2008, 31(7): 1224-1233(in Chinese)
(龚永义, 罗笑南等. 基于改进的弹簧质子模型的医学图像配准. *计算机学报*, 2008, 31(7): 1224-1233)
- [29] Xu C, Prince J L. Snakes, shapes, and gradient vector flow. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, 7(3): 359-369



GONG Yong-Yi, born in 1970, Ph. D.. His research interests include image registration, image segmentation and image/video upsampling.

LUO Xiao-Nan, born in 1963, Ph.D., professor, Ph.D. supervisor. His research interests include digital home technology, mobile computing, computer graphics & CAD, image processing.

Background

The research is supported by the NSFC-Guangdong Joint Fund under Grant No. U0735001, No. U0835004, No. U0935004, the National Basic Research Program (973 Program) of China under Grant No. 2011CB302204, Zhejiang Natural Fund under Grant No. Y1090169.

To find a method to upsample low-resolution image/video

for displaying them in different devices, such as handphone, HDTV, etc, we propose a new method for upsampling images by converting the image upsampling to as the problems of mechanics balance based on moving-constrained spring-mass model and upsampling base on deformed grid. The experiments show our works are useful.