

基于 Delaunay 三角剖分的图象变形技术研究

朱桂斌^{1,2)} 张邦礼¹⁾ 吴乐华²⁾ 胡中豫³⁾

¹⁾(重庆大学自动化学院, 重庆 400044) ²⁾(重庆通信学院研究生管理大队, 重庆 400035)

³⁾(重庆通信学院训练部, 重庆 400035)

摘要 提出了一种新的图象变形方法,即基于 Delaunay 三角剖分的图象变形方法.与四边形网格方法相比,用三角形网格定义特征区域,特征点的选取更自由、数目更少.针对变形过程中运算量最大的坐标变换,提出了一种基于 Bresenham 算法的坐标变换算法.该算法完全采用加减运算,避免了乘法及舍入取整运算,大大加快了图象变形的运算速度.计算机仿真试验表明,在同等数目控制点的条件下,该算法变形效果及运算速度均优于四边形网格方法.

关键词 计算机图象处理(520·6040) 图象变形 三角形网格 控制点 Delaunay 三角剖分

中国法分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)06-0641-06

Research on Metamorphosis Using Delaunay Triangulation

ZHU Gui-bin^{1,2)}, ZHANG Bang-Li¹⁾, WU Le-hua²⁾, HU Zhong-yu³⁾

¹⁾(Automation college of Chongqing University, Chongqing 400044)

²⁾(Postgraduate Department of Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035)

³⁾(Training Administration Department of Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035)

Abstract This paper presents a new method to implement the digital image morphing based on Delaunay triangulation. Contrasting to the usually used quadrilateral meshes, the character regions are defined by triangular meshes, which can allow a more freely selection of control points and much less number of the selected control points. The two triangular meshes are determined by the corresponding control points on the two morphing images. In order to define a unique triangular mesh using a set of points on the integer grids as in digital images, three additional criterions are proposed as the complementary rule to the Delaunay triangulation. According to the large amount of computation in the coordinate transform process, a new algorithm of coordinate transform is presented based on the classical Bresenham algorithm, only addition and subtraction computation is employed, the multiplication and round computation are avoided, and then the whole process was accelerated greatly. With the new method a satisfying morphing result has been acquired.

Keywords Computer image processing, Image metamorphosis, Triangular mesh, Control point, Delaunay triangulation

0 引言

图象变形技术是指实现由一幅图象流畅地转变为另一幅图象的方法.图象变形传统上与娱乐业的视觉效果相联系,这在目前的电影和电视中有许多例子,如《Willow》、《Indiana Johns》和《The last

crudade》等影片就成功地应用图象变形技术实现了惊人的视觉效果.由于图象变形技术本质上是在两幅图象之间进行插值,故它也可应用到其他领域中.比如在医学成像中,一系列 CT 或 MRI 的扫描图象都有一固定的物理间隔,虽然中间的图象可由传统的线性的、二次的或更高度数的插值函数计算得到,但这种传统的方法没有考虑成像组织的内在结构,而使用

基金项目:重庆市科技计划项目(200113-6982)

收稿日期:2002-04-09; 改回日期:2003-01-28

图象变形技术,在此却获得了更加理想的结果,文献[1]中描述了这一领域的工作.脸部识别的最新研究工作也使用了变形技术,如 Bichsel 提出的从一幅图变到另一幅图时产生最优映射的新方法^[2],已被用于在同一张脸的不同视觉之间和不同人的图象之间进行插值,该技术在不同视觉和光照条件下的脸部识别应用上得到证实.另外,图象变形也已被用于嘴唇的同步活动^[3],在这项应用中,系统能自动合成脸部,且在自动合成脸部时,有恰当的嘴唇同步活动,它是一个由声控输入驱动的脸部动画系统,它可用于电影配音、远程会议和生成特技效果.

图象变形技术是图形学中的一个重要问题,也是一个较为成熟的问题,坐标变换和图象内插是最关键的两项技术,其中,图象坐标变换是指如何通过图象上有限的控制点的坐标变化来界定整幅图象的坐标点变化,以便在原始图象和变形图象之间建立起坐标映射关系;而图象内插是指如何确定变形图象中每一像素的颜色取值,通常这由原始图象和目标图象综合坐标映射内插得到.变形的过渡控制虽然对变形结果产生很大的影响,但它更多地体现为操作人员的意愿.

迄今为止,图象变形的算法有多种多样.最早提出的是网格变形,它是由 Smythe 于 1988 年提出的^[4],其主要特点是在原始图象和目标图象上建立四边形的对应网格,利用网格的变形确定坐标映射关系,变形时使用线性插值.后来 Beier 和 Neely 在文献[5]中提出了基于特征的变形,其特点是通过直线定义特征区域,保证了各个特征之间的过渡.这是两种基本的基于图象的变形方法,是其他复杂方法的基础.这两种方法各有优劣:网格变形不容易定义图象的特征,而且当网格很多时不易操作控制;而特征变形则是速度不太理想.

基于 Delaunay 三角剖分的图象变形方法,则采用三角形网格定义特征区域,并提出了一种基于 Bresenham 算法^[6]的坐标变换算法.

1 Delaunay 三角剖分

1934 年,俄国数学家 Delaunay 曾经指出:对于平面域上的 N 个散乱点集,存在且仅存在一种三角剖分,使得所有三角形的最小内角之和为最大,一般称之为 Delaunay 三角剖分,以下简称 DT (Delaunay Triangulation).显然,DT 使得所形成的每个三角

形尽可能接近等边三角形,避免病态三角形的出现,因此得到了广泛的应用.

根据 DT 的定义,可以导出 DT 满足下面两条准则:

(1) 共圆准则,即任意三角形的外接圆将不包含任何其他数据点,此准则也常被称为“空圆盘性质”.

(2) 最大最小角准则,即对任意相邻的两个三角形所构成的四边形来说,DT 要求该四边形的一条对角线所分成的 2 个三角形中所有的 6 个内角中的最小值将大于另外一条对角线所构成的 2 个三角形中所有的 6 个内角中的最小值.此准则使 DT 尽可能避免产生那种狭长的、具有尖锐内角的病态三角形.

这两条准则是构造三角剖分算法的基础.

应当提出的是,DT 的定义并不是完备的.在构造 DT 的过程中,有可能某一个要加入当前 DT 结构的数据点与其他 3 个(或 3 个以上)数据点共圆,这时,常规 DT 的构造可以任意进行,即无论连接哪一条对角线都不违背 DT 的定义,这种情况称为 DT 的退化.由于产生了“二义性”,当发生 4 个(或 4 个以上)的数据点共圆时,常规 DT 的构造就不单由算法本身决定,而也取决于数据点的访问顺序.当数据的访问顺序发生变化时,单一的算法可能会产生不同的 DT 结果,从而发生错误.由于所有的数据点均位于离散的图象栅格上,因此这种退化是有可能发生的.

为了解决退化引起的“二义性”问题,对常规 DT 的构造准则作了 3 条补充^[7],使 DT 的构造与数据点的访问次序无关,即真正实现数据点集与 DT 的一一对应关系.设要新加入的点 D_4 与 DT 中的 D_1, D_2, D_3 共圆,具体规则如下:

规则 1 对共圆的 4 个数据点,取其中的一条对角线作为 DT 的一个分割,这条对角线应比另一条对角线更加接近任一条坐标轴.由于实际图象中边界的方向为水平和垂直的较多,且人眼对这两个方向的边界信息也较为敏感,故这条规则的提出是合理的.

规则 2 如果这两条对角线所在的直线以某条坐标轴为对称轴对称,(即规则 1 仍不能确定如何分割),则取这两条对角线中更加靠近 45° 方向的一条对角线作为 DT 的分割.

规则 3 如果这两条对角线所在的直线以 45° 方向或 135° 方向为对称轴对称,(即规则 1、2 仍不能确定如何分割),则取这两条对角线中更加靠近垂直

坐标轴方向的一条对角线作为 DT 的分割.这样就解决了常规 DT 退化时可能发生的“二义性”问题.

对于更为复杂的退化情况(5 点或 5 点以上的数据共圆)最终仍归结为四边形对角线连接的判断,以上 3 条规则也可以纠正这类退化错误.

2 基于 Delaunay 三角剖分的图象变形方法

2.1 基于 Delaunay 三角剖分的图象变形方法

基于 Delaunay 三角剖分的图象变形方法总体上类似于基于网格变形的的方法.首先给定两幅图象,将这两幅图象分别称之为 I_s 和 I_T ,即源图象和目标图象,在这两幅图象上定义一系列相应的控制点对,

由在源图象上的控制点系列和源图象矩形区域的 4 个顶点,可以在源图象上构造一个 DT,此 DT 中的所有三角形组成了一个源控制网格 M_s ,它的形状由控制点的坐标和 DT 算法共同确定.第 2 个网格 M_T 指定了它们在目标图象中的对应位置.具体变形过程如图 1 所示,为简单起见,图中只有一个控制点.图中显示出网格 M_s 和 M_T 分别对左图和右图形成全覆盖, M_s 和 M_T 一起用于定义空间坐标转变,此空间坐标转变将 I_s 中所有点映射到 I_T 上去.这些网格要求限于拓扑同构,即不允许有区域折叠和不连续的情况发生,对于实际的变形应用来说,这并不是一个十分苛刻的要求.因此,在 M_T 上的结点可以根据需要远离 M_s ,只要它们不引起自相交即可.此外,为了简化起见,这些网格仅限于有固定的边界.

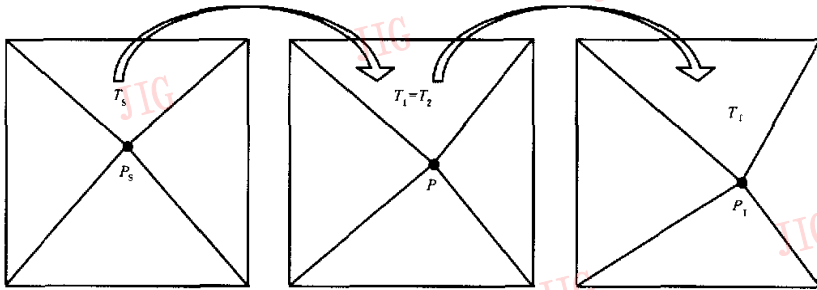


图 1 DT 网格的变形过程示意图

在变形序列中所有的中间帧是以下 4 步过程的产物:

for 每一中间帧 do

- ① 在 M_s 和 M_T 之间线性插值网格 M
- ② 利用网格 M_s 和 M 将 I_s 形变到 I_1
- ③ 利用网格 M_T 和 M 将 I_T 形变到 I_2
- ④ 在 I_1 和 I_2 之间线性插值图象 I_f

end

在上述步骤中,第 1 步和第 4 步(即变形过程控制)虽然对最后的视觉效果会产生重大的影响,但它更多是由最后的动画特技人员确定,在此可首先简化为线性插值.第 2 步和第 3 步是本变形算法的核心,但这两步过程类似,故以第 2 步为例介绍其实现过程.

由于三角形网格 M_s 和 M 限于拓扑同构,网格中的三角形为一一对应,并且它们对相应的图象 I_s 和 I_1 形成全覆盖,所以整个图象的变形可以简化为其中对应的三角形区域的变形.

假设要将图 1 中的 T_s 变形为 T_1 ,这里有两种方

法:第 1 种是正向变形,它对源图象中每一个点做坐标变换,得到其在目标图象中的位置,然后将颜色值拷贝过去;第 2 种是反向变形,它对目标图象中的每一个点进行计算,得到其在源图象中的位置,然后将颜色值拷贝过来.正向变形有一个问题,就是目标图象中有可能有的像素没有颜色值,而反向变形可以保证目标图象中每一个点都能在原始图象中找到对应的点,所以这里采用反向变形技术.

设 T_s 和 T_1 的对应顶点分别为 P_{s1}, P_{s2}, P_{s3} 和 P_1, P_2, P_3 ,则由这 6 个点可唯一确定一个仿射变换

$$\begin{pmatrix} P_s.x \\ P_s.y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P.x \\ P.y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $P.x, P.y$ 为 T_1 中某点 P 的 x, y 坐标, $P_s.x, P_s.y$ 为 T_s 中某点 P_s 的 x, y 坐标.令

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{pmatrix}$$

则

$$A = \begin{pmatrix} P_{S_1, x} & P_{S_2, x} & P_{S_3, x} \\ P_{S_1, y} & P_{S_2, y} & P_{S_3, y} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1, x & P_2, x & P_3, x \\ P_1, y & P_2, y & P_3, y \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \quad (2)$$

只要三角形 T_1 没有退化为一 条直线或一个点, 式(2)是一定可解的, 实际上若 T_1 发生了退化, 但由于网格中所有的三角形的边界和与其相邻三角形的边界是重合的, 式(2)不可解也不影响整个图象变形的效果。

这样, 总体变形过程的第 2 步可细化为

for I_1 中每一三角形 do

- ① 用式(2)计算 A
- ② for 三角形中的每一点 do
 - ③ 用式(1)计算对应点在源图象中的坐标
 - ④ 由于③中得到的坐标不一定是整数, 故用其相邻像素内插出其颜色值
 - ⑤ 拷贝颜色值入当前帧图象 I_1

end

end

以上步骤中计算量最大的为第 3 和第 4 步, 因为它们处于最内层的循环中. 第 3 步中每计算一个像素的坐标需 4 次浮点乘法运算和 6 次浮点加法运算, 第 4 步计算相邻像素坐标又要进行舍入取整, 因此提出一种基于 Bresenham 算法的快速算法, 以避免浮点乘法和舍入取整, 可以大大减少运算量。

2.2 三角形坐标变换的快速算法

假设要将中间三角形 T 的坐标反向映射到源三角形 T_s 中, 为提高效率, 必需按顺序扫描 T 中所有的点, 为此, 将 T 分为两部分, 即 $\triangle ABD$ 和 $\triangle BCD$, 如图 2 所示, 对于这两个三角形中的每一条整数纵坐标的扫描线, 求出其整数端点坐标, 如 T 中的点 1 和点 2, 用式(1)求出其在源三角形中的对应点 $1'$ 和 $2'$, 此时的坐标不一定是整数. 下面以计算对应各点的 x 坐标为例介绍此算法。

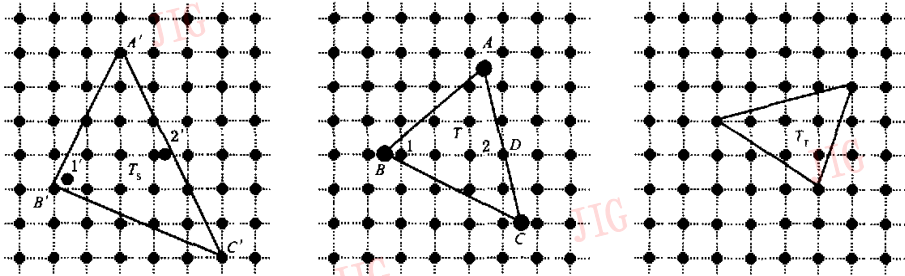


图 2 三角形坐标变换的快速算法

令

$$\Delta y = 2'.x - 1'.x, \Delta x = 2.x - 1.x$$

$$k = \left\lfloor \frac{\Delta y}{\Delta x} \right\rfloor, m = \left\{ \frac{\Delta y}{\Delta x} \right\} = \frac{\Delta y}{\Delta x} - \left\lfloor \frac{\Delta y}{\Delta x} \right\rfloor$$

其中, $\lfloor x \rfloor$ 表示不大于 x 的最大整数, 即 x 的整数部分, $\{x\}$ 为 x 的分数部分, 这时有 $0 \leq m \leq 1$. 类似于生成直线的 Bresenham 算法^[6], 令

$$\epsilon_{i+1} = x_{i+1} - k - x_{i,r} - 0.5 \quad (3)$$

式中, i 表示序号, r 为已舍入标记, $x_{i,r}$ 表示 x_i 的舍入结果, 则有

$$x_{i+1,r} = \begin{cases} x_{i,r} + k + 1, & \epsilon_{i+1} \geq 0 \\ x_{i,r} + k, & \epsilon_{i+1} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可得

$$\begin{aligned} \epsilon_{i+2} &= x_{i+2} - k - x_{i+1,r} - 0.5 \\ &= x_{i+1} + m - x_{i+1,r} - 0.5 \end{aligned}$$

$$= \begin{cases} x_{i+1} - x_{i,r} - 0.5 + m - 1 & \epsilon_{i+1} \geq 0 \\ x_{i+1} - x_{i,r} - 0.5 + m & \epsilon_{i+1} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$= \begin{cases} \epsilon_{i+1} + m - 1 & \epsilon_{i+1} \geq 0 \\ \epsilon_{i+1} + m & \epsilon_{i+1} < 0 \end{cases}$$

式(4)和式(5)组成了一个计算 $x_{i+1,r}$ 和 ϵ_{i+2} 的递推公式. 初始化时, 取 $x_1 = 1'.x$, 由式(3)得

$$\begin{aligned} \epsilon_2 &= x_2 - k - x_{1,r} - 0.5 \\ &= x_2 - k - x_1 - 0.5 + \{x_1 + 0.5\} - 0.5 \\ &= x_2 - x_1 - k - 1 + \{x_1 + 0.5\} \\ &= m - 1 + \{x_1 + 0.5\} \end{aligned} \quad (6)$$

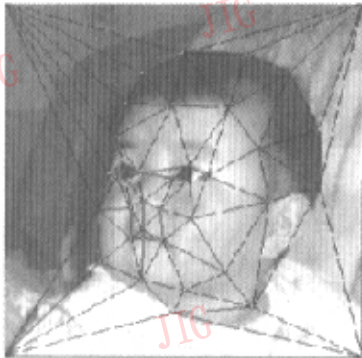
由式(4)和式(5)知, 除每条线的初始化过程外, 对应坐标的计算过程没有乘除运算和舍入运算, 故可大大提高计算速度. 对于 y 坐标的计算与此类似。

以上算法对于最邻近插值最为有效, 如需其他插值方法(如双线性插值), 则 $\epsilon + 0.5$ 刚好作为一个插值的加权因子。

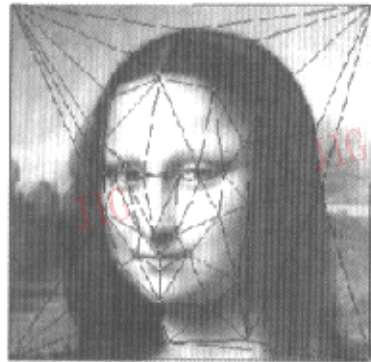
3 实验结果

运用本文提出的算法,用 Visual C++ 在 Windows98 操作系统上进行了实验,结果如图 3 和图 4 所示,图 3 为源图象、源控制点及源三角形网络和相应的目标图象、目标控制点及相应目标三角形

网络.在此例中,源图象和目标图象的大小均为 360×360,控制点数目为 40 个,三角形数目为 74 个,在源图象和目标图象之间插入了 6 帧图象,变形控制为线过渡,颜色内插为最邻近插值.实际变形效果如图 4 所示,结果显示,人像面部的平滑变形过渡令人满意.



(a) 源图象以及源控制网格



(b) 目标图象及对应控制网格

图 3 变形图象及控制点网格

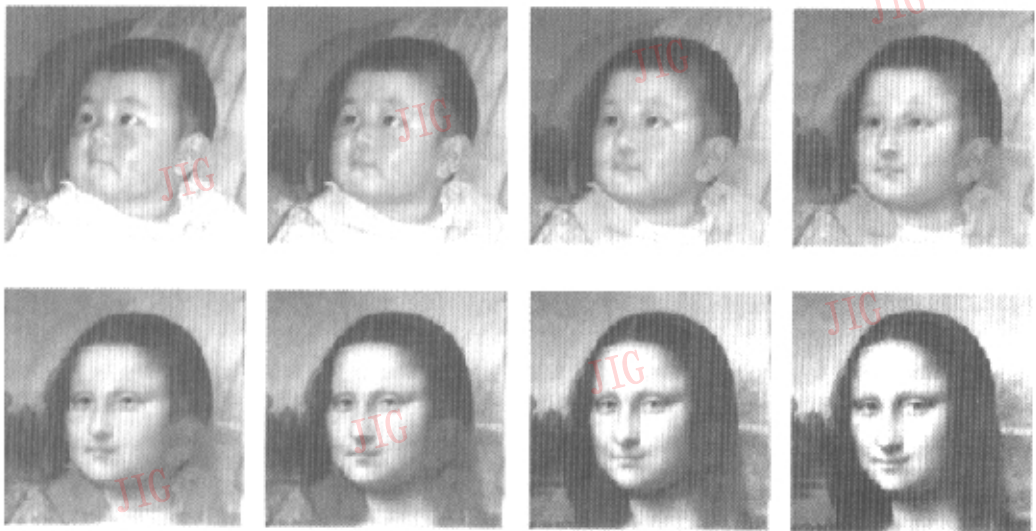


图 4 实际变形效果

4 结 语

本文提出了一种新的图象变形方法,即基于 Delaunay 三角剖分的图象变形方法.该方法通过三

角形网格定义特征区域,和四边形网格方法^[8]相比,本方法的特征点选取更自由、数目更少.针对变形过程中运算量最大的坐标变换,提出了一种基于 Bresenham 算法的坐标变换算法,此算法完全采用加减运算,避免了乘法及舍入运算,大大加快了图象

变形的运算速度,和直接采用式(1)的浮点计算结果相比,该坐标变换算法使整个变形过程的时间缩短了约38%。在实际的操作过程中,对应特征点的指定是一件最乏味事情,在本例中只有40对特征点尚不算多,但要得到更好的变形效果,必须指定更多的特征点对以及小心关注其精确位置,为此,特征点对的自动选取及匹配将是值得进一步研究的内容。另外,如何将这一方法推广到视频序列间的自动变形中去也是下一步研究的内容。

参 考 文 献

- 1 Kuprecht D, Müller H. Deformed cross-dissolves for interpolation in scientific visualization [J]. The Journal of Visualization and Computer Animation. 1994, 5(3):167~181.
- 2 Michael M. Automatic interpolation and recognition of face images by morphing[A]. In: The 2nd International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition[C]. Los Alamitos, CA, USA. IEEE Computer Society Press, 1996: 128~135.
- 3 Bregler C, Covell M, Slaney M. Video rewrite: driving visual speech with audio[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'97[C]. Los Angeles, CA, USA, 1997, 353~360.
- 4 Smythe DB. A two-pass mesh warping algorithm for object transformation and image interpolation[R]. Technical Report 1030. ILM Computer Graphics Department, Lucasfilm, San Rafael, Calif, 1998.
- 5 Beier T, Neely S. Feature-based image metamorphosis[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'92 [C], Chicago, Illinois, USA, 1992, 26:35~42.
- 6 唐荣锡,汪嘉业,彭群生等. 计算机图形学教程[M]. 北京:科学出版社, 1994.
- 7 朱桂斌. 高清晰度静止图象压缩编码技术研究[D]. 长沙:国防科技大学电子工程学院, 1997.
- 8 杨金钟等. 基于控制点的图象变形方法及其应用[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6A(11):1070~1074.



朱桂斌 1972年生,讲师,1997年获国防科技大学电子工程学院硕士学位,现为重庆大学博士生. 主要研究领域为图象处理、模式识别、人工神经网络.



张邦礼 1941年生,学士,教授,研究生导师. 主要研究领域为人工神经网络、小波理论、计算智能.



吴乐华 1965年生,硕士,教授,研究生导师. 主要研究领域为信息安全、图象处理、模式识别.



胡中豫 1954年生,硕士,教授,研究生导师. 主要研究领域为信息安全、保密通信.