

基于控制点的图象变形方法及其应用

杨金钟 刘政凯 俞能海 吴皓

(中国科学技术大学信息处理中心, 合肥 230027)

摘要 根据人脸,特别是根据人脸在人眼变形中对形状和细节的要求,提出了用光滑不等距插值和空间可变线性插值方法来实现基于控制点网格的数字图象变形的想法。其中,光滑不等距插值用来实现图象的坐标变换,而空间可变线性插值则用来实现图象的灰度插值,同时,可将变形过程中图象的坐标变换和灰度插值分开操作,用以取代原来行和列的分别变形操作,实验结果证明,用这种方法不仅能获得很好的变形效果,且使用该方法进行人眼的变形操作也取得了满意的结果。

关键词 图象变形 控制点网格 光滑不等距插值 距离偏差 空间可变线性插值

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2001)11-1070-05

An Image Warping Method Based on Control Points and Its Applications

YANG Jin-zhong, LIU Zheng-kai, YU Neng-hai, WU Hao

(Information Processing Center, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Abstract This paper presents a method of implementing the digital image warping based on control points by combining smooth unequally-spaced interpolation and space-variant linear image interpolation method. The smooth unequally spaced interpolation is used to establish the locality relationship between the original and the warped image. It maps the coordinates in original image to corresponding position in warped image. The space variant linear image interpolation provides an efficient way to reconstruction an image. The image interpolation method has been proved simple with a good visual result. During the warping process the operation of image coordinates transformation and image interpolation are separated, which replaces the traditional warping operation by row and column gradually. This operation reduces the complexity and saves computing time. With the new method a good warping result has been acquired. This method has been applied to human eyes morphing operation and satisfied result has been achieved. According to the high requirements of keeping regular shape and edge information in eyes morphing, this image warping method proves applicable.

Keywords Image warping, Control point mesh, Smooth unequally-spaced interpolation, Warp distance, Space-variant linear image interpolation

0 引言

数字图象的变形是指利用图象上有限的几个控制点,并通过对这些控制点的移动控制,来使整幅图象产生几何变化,以达到预期变化效果的一种技术。

而基于控制点网格的图象变形算法是由 Smythe 于 1990 年提出的,它已被成功地应用于电影特技效果的制作中,并在《Indiana Johns》和《The last crusade》等影片中取得了很大成功。

基于控制点网格的图象变形,其基本思想是分两步完成图象变形过程,即第 1 次沿横向对图象作

变形处理;第 2 次沿纵向再对图象作变形处理,从而完成整幅图象的变形过程. 它的关键技术包含图象坐标变换和图象重采样两个方面,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;而图象重采样是指通过灰度内插来从原始图象重建变形图象,并使重建图象尽量保留原始图象的信息,特别是对高频成分(即细节部分)信息的保留. 文献[1]曾采用三次样条插值的方法在原始图象和变形图象之间建立起坐标变换关系,但样条插值存在的问题则是它不能很好地模仿实际变形的效果. 为此,本文提出用另外一种插值方法——光滑不等距插值^[2]方法来模拟变形;而对于重采样技术,为了获得较好的重建效果,并节省运算时间,本文采用了 Giovanni Ramponi 提出的一种将偏差距离应用于空间可变速线性图象插值(Warped distance for space-variant linear image interpolation)^[3]的方法. 另外,在图象的变形过程中,本文还提出先对图象坐标进行横向和纵向的变换,以建立坐标映射关系;然后再根据得到的坐标映射来进行整体图象插值,以替代传统的对图象横向和纵向分别进行变形的办法,由于这种方法把坐标变换和图象插值分离开来,因此易于实现,并且只需要进行一次图象插值运算.

在人眼变形中,由于眼睛的视觉效果受形状的影响很大,轮廓线又要求非常平滑,且细节成分丰富,因此对变形的要求很高. 为此,本文首先将原始控制点网格由矩形形状改变为可任意输入的形状,再通过曲线插值拟合得到控制点网格,然后应用上述变形方法进行的操作,这样得到的结果,不仅能够适应眼睛形状变化的要求,而且得到的变形结果轮廓清晰平滑,且细节保留完好,从而为人眼变形提供了一种较为实用的方法.

1 控制点插值

对于给定的结点进行插值的方法有很多种,笔者曾尝试了多种插值方法,并对用各种方法插值所得的控制点网格进行了比较,最后选定了用光滑不等距插值^[2]方法来实现控制点插值. 实际结果证明,该方法能够在变形区域内很好地模拟变形的效果.

这种光滑不等距插值的基本原理为:

给定 n 个不等距结点上的函数值如下表所示.

表 1 n 个不等距结点上的函数值表

| | |
|-----------|---------------------------------|
| x | $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}$ |
| $y, f(x)$ | $y_1, y_2, y_3, \dots, y_{n-1}$ |

其中, $x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_{n-1}$. 据此就可以首先用阿克玛(Akima)方法来构造指定子区间上的三次插值多项式.

若在子区间 $[x_k, x_{k+1}] (k=1, 2, \dots, n-1)$ 上的两个端点处满足以下 4 个条件

$$\begin{cases} y_k = f(x_k) \\ y_{k+1} = f(x_{k+1}) \\ y'_k = g_k \\ y'_{k+1} = g_{k+1} \end{cases} \quad (1)$$

则可以唯一地确定如下一个三次多项式:

$$S(x) = A + B(x - x_k) + C(x - x_k)^2 + D(x - x_k)^3 \quad (2)$$

然后用该多项式就可以计算该子区间上各个插值点的函数值,而该多项式的系数求法如下:

根据 Akima 几何条件,由下式计算 g_k 与 g_{k+1} :

$$g_k = \frac{|u_{k+1} - u_k|u_{k-1} + |u_{k-1} - u_{k-2}|u_k}{|u_{k-1} - u_k| + |u_{k-1} - u_{k-2}|}$$

$$g_{k+1} = \frac{|u_{k+2} - u_{k+1}|u_k + |u_k - u_{k-1}|u_{k+1}}{|u_{k+2} - u_{k+1}| + |u_k - u_{k-1}|}$$

当 $u_{k+1} = u_k$ 与 $u_{k-1} = u_{k-2}$ 时, $g_k = (u_{k-1} + u_k) / 2$

当 $u_{k+2} = u_{k+1}$ 与 $u_k = u_{k-1}$ 时, $g_{k+1} = (u_k + u_{k+1}) / 2$

其中, $u_k = (y_{k-1} - y_k) / (x_{k-1} - x_k)$, 且在端点处需要满足以下条件:

$$u_0 = 2u_1 - u_2, u_{n-1} = 2u_n - u_{n-2}$$

最后即可以求得在子区间 $[x_k, x_{k+1}]$ 上的三次多项式的系数为

$$\begin{aligned} A &= y_k \\ B &= g_k \\ C &= (3u_k - 2g_k - g_{k+1}) / (x_{k+1} - x_k) \\ D &= (g_{k+1} + g_k - 2u_k) / (x_{k+1} - x_k) \end{aligned} \quad (3)$$

应用上述的插值方法,就可以对控制点进行插值,以形成控制点网格. 这里对控制点进行插值分如下两个步骤进行:首先对每一行控制点的纵坐标进行光滑不等距插值,这样就可以得到每一行控制点的插值曲线;然后,对每一列控制点的横坐标进行光滑不等距插值,这样就可以得到每一列控制点的插值曲线. 经过上述两个步骤就可以得到控制点网格. 图 1 显示了原始控制点和目标控制点的插值网格曲线.

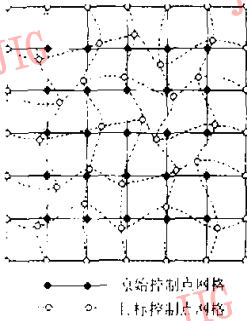


图1 光滑不等距插值得到的控制点网格

2 空间可变线性灰度插值

常见的图象重采样方法有最近邻法、双线性插值以及双三次灰度插值方法。前两种方法虽然运算速度较快,但重建的图象效果并不理想,特别是容易造成图象高频成分的丢失;第三种方法虽可以获得较好的重建效果,但需要耗费较多的运算时间。由于这里将 Giovanni Ramponi 提出的空间可变线性插值方法^[2]应用于图象变形中的图象重建,因而获得了较快的运算速度和较好的插值效果。

假设 x_k 和 x_{k+1} 间有一插值点 $x(x_{k+1} > x_k)$, 则可将 x_k 和 x_{k+1} 之间的距离定义为

$$s = x - x_k, \quad 1 - s = x_{k+1} - x$$

其中,若 $0 \leq s \leq 1$, 则线性插值的结果为

$$\hat{f}(x) = (1-s)f(x_k) + sf(x_{k+1}) \quad (4)$$

这里用偏差距离 (Warped Distance) s' 来代替式中的距离 s 。由于该偏差距离是指只考虑对插值运算结果有影响的有效数据,从而可以改变距离 s , 即线性插值的系数。其中,有效数据指的是,如果被插值的像素位于修正后的距离 s' 内,就认为该像素是有效数据。在这里,由距离 s 改变到 s' 的目的,是为了“移动”该像素本身到附近的像素点,以便产生最佳的视觉效果。应用偏差距离的一个简单实现方法如下:

首先估计在 x 附近数据的非对称性程度

$$A = \frac{|f(x_{k-1}) - f(x_k)| - |f(x_k) - f(x_{k+1})|}{L} \quad (5)$$

对于 256 级灰度 (8bit) 图象,其 $L=256$, A 的变化范围在 $[-1, 1]$ 之间。若 $A=0$, 则表示 x 附近图象对称;若 $A > 0$, 则表示 x 的右边部分均匀一些,且右边部分的像素对插值结果的影响要大一些,因此如果 $A > 0$, 应该有 $s' > s$, 即向右偏;反之,如果 $A < 0$,

应该有 $s' < s$, 即向左偏。

然后,若考虑到以 s' 替代 s , 则 s' 的变化范围应该与 s 相同,即变化范围为 $[0, 1]$, 为此应作如下映射变换: $A \rightarrow -kAs(1-s)$, 这样修正后的偏差距离 s' 为

$$s' = s - kAs(s-1) \quad (6)$$

式中,系数 $k \geq 0$, 它用来控制偏差的强度。易于证明,当 $k \leq 1$ 时,能够保证 s' 在 $[0, 1]$ 之间;而实际上,当 $k > 1$ 时,出现误差的可能性比较小,而且即使出现误差,一般也是在图象的边缘,不仅影响不大,还会起到增强边缘的作用,这样反而会获得更佳视觉效果^[2]。

由以上式 (4)、(5)、(6) 组成的空间可变线性插值方法,可以获得更好的灰度插值效果,其与三次样条、双三次插值、普通双线性插值的误差比较可以参考文献 [3]。

本文将上述方法应用到二维图象的插值中,即从横向和纵向上分别应用空间可变线性插值方法,这样就得到了空间可变双线性插值。对于点 (x, y) ($x_k \leq x \leq x_{k+1}$, $y_l \leq y \leq y_{l+1}$) 的估计值也可以通过如下插值公式得到:

$$\hat{f}(x, y) = (1-a)(1-\beta)f(x_k, y_l) + (1-a)\beta f(x_k, y_{l+1}) + a(1-\beta)f(x_{k+1}, y_l) + a\beta f(x_{k+1}, y_{l+1}) \quad (7)$$

式中, $a = s_x - kA_x s_x (s_x - 1)$, $\beta = s_y - kA_y s_y (s_y - 1)$

$$A_x = \frac{|f(x_{k-1}, y_l) - f(x_k, y_l)| - |f(x_k, y_l) - f(x_{k+1}, y_l)|}{L_x}$$

$$A_y = \frac{|f(x_k, y_{l-1}) - f(x_k, y_l)| - |f(x_k, y_l) - f(x_k, y_{l+1})|}{L_y}$$

$$s_x = x - x_k, \quad s_y = y - y_l$$

其中,取 $k=1$, $L=256$ (对于真彩色 (24bit) 图象还可以通过 R、G、B 3 个通道分别插值获得,故取 L 为 256)。

3 基于控制点网络的图象变形

3.1 基于控制点网络的图象变形

基于控制点网络图象变形有如下一些特点:(1)只需要改变有限的几个控制点,图象上的其他点会在控制点的作用下自动调整位置;(2)改变控制点的位置只会影响到该控制点附近的区域,而其他区域不受影响。根据以上特点,就可以通过控制点网络来实现图象的变形。

图 2 是由光滑不等距插值得到的控制点网络的一部分,若原始控制点 a 移动到 a' (目标控制点),则原来由插值得到的通过 a 点的原始网格线 l_1, l_2, l_3, l_4 也分

别移动到通过 a' 的目标网格线 I', I'', I''', I'''' 处, 同时点 a 附近的区域也发生了相应的变化, 即原来的矩形区域 A, B, C, D 分别变成了 A', B', C', D' (如图 2 所示)。同时需要在相应的变化区域之间建立起一个坐标对应关系, 例如区域 A 上的每一坐标点在 A' 上的映射。由于各个原始区域和目标区域的边界可以通过第 1 节中所述的插值方法得到, 因此区域边界的坐标映射可以通过原始控制点网格和目标控制点网格建立起来, 而区域内部的坐标映射则可以通过简单的比例变换得到, 即首先建立 X 坐标的变换关系, 假设区域 A 上 y_k 行的 X 坐标范围为 $[x_k, x_{k+1}]$, 区域 A' 上 y_k 行的 X 坐标范围为 $[x'_k, x'_{k+1}]$, 则区域 A 上 y_k 行 x 的坐标与区域 A' 上 y_k 行 x' 的坐标对应关系可由下式得到

$$x' = x'_k - \frac{x'_k - x'_k}{x_{k+1} - x_k}(x - x_k) \quad (8)$$

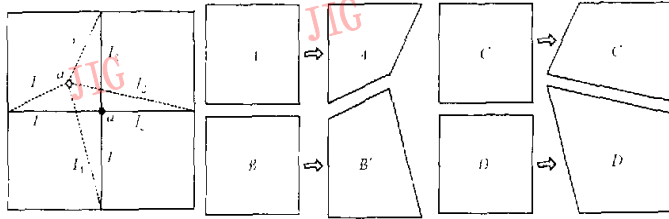


图 2 控制点网格变形过程

3.2 基于控制点网格图象变形的实现流程

基于控制点网格图象变形的实现流程如下:

第 1 步, 输入原始图象数据矩阵 I (图象宽度 w , 高度 h); 同时输入原始控制点矩阵 S 以及目标控制点矩阵 D (控制点行数 c , 和列数 c_x)。

第 2 步, 运用第 1 节中所述方法对原始控制点矩阵 S 的每行及每列控制点坐标进行插值, 并将插值结果分别保存在 $srcXGrid$ 和 $srcYGrid$ 中, $srcXGrid$ 用于储存每行控制点插值的 Y 坐标, $srcYGrid$ 用于储存每列控制点插值的 X 坐标, $srcXGrid$ 的维数为 $w \times c$, $srcYGrid$ 维数为 $c_x \times h$; 然后用同样的方法对目标控制点矩阵 D 的每行及每列控制点坐标进行插值, 再将结果保存到 $dstXGrid$ 和 $dstYGrid$ 中。

第 3 步, 根据 $srcYGrid$ 存储的 X 坐标和 $dstYGrid$ 存储的 X 坐标之间的变换关系, 用 3.1 节中所述的方法来求出原始图象到目标图象的 X 坐标的映射 $MapX$; 再根据 $srcXGrid$ 存储的 Y 坐标和 $dstXGrid$ 存储的 Y 坐标之间的变换关系, 用线性插值方法来获得原始图象到目标图象的 Y 坐标的映

射 $MapY$ 。用这种方法来对每一行进行处理, 就可以得到区域 A 上每一行的 X 坐标在区域 A' 上的映射; 然后再用相同的方法对列进行处理, 就可以得到区域 A 上每一列的 Y 坐标在区域 A' 上的映射。如果对整幅图象上的每一个网格(区域)都用上述方法做一次变换, 那么即可在原始图象和变形图象之间建立起 X 坐标和 Y 坐标的对应关系; 最后通过该坐标变换关系, 再运用第 2 节中提到的空间可变线性插值方法来重建图象, 就可以获得变形的结果。

应用这种先建立图象的坐标变换关系, 然后再进行图象插值的方法, 只需要进行一次图象插值运算, 而传统的基于网格的变形方法是分别对 X 方向和 Y 方向进行变形的, 因而需要两次的图象插值运算。由此可见, 运用该方法, 可以节省一次插值运算时间。

射 $MapY$ 。

第 4 步, 用第 2 节中所述的空间可变双线性插值方法, 即公式(7), 再根据 $MapX$ 和 $MapY$ 中指定的映射关系来对图象进行灰度插值重建, 即可获得变形结果图象。

在 $srcXGrid$, $srcYGrid$, $dstXGrid$, $dstYGrid$ 中以双精度实型数作为存储单元; $MapX$ 和 $MapY$ 的存储单元也是双精度实型数。

4 人眼变形中的应用

本文将上述基于控制点网格的图象变形方法应用到人眼的变形中。由于在人眼变形中, 对眼睛形状变化有一定的要求, 为此, 本文首先将原始控制点按照眼睛的形状分布, 拟合出人眼轮廓的曲线, 然后让控制点随要求的变化形状而变化, 从而实现了人眼的变形过程。该方法不仅适应了眼睛形状变化的要求, 而且得到的变形结果轮廓清晰平滑, 细节保留完整, 获得了很好的变形效果。

人眼变形的实现过程如下:

(1) 控制点输入 根据眼睛的形状,分别在眼角和眼睛的上边缘以及下边缘输入适当数目的控制点,如图 3(b)所示。

(2) 选择适当的网格参数 用第 1 节中所述的插值方法来对步骤(1)中输入的控制点进行插值,以生成原始控制点网格,如图 3(c)所示。

(3) 根据眼睛变形要求移动控制点到指定的位置,对移动后的控制点进行插值,以生成目标控制点网格,如图 3(d)所示。

(4) 用第 3 节中所述的方法进行网格变形操作,最后运用第 2 节中所述的方法重建出变形结果图象,如图 3(e)所示。

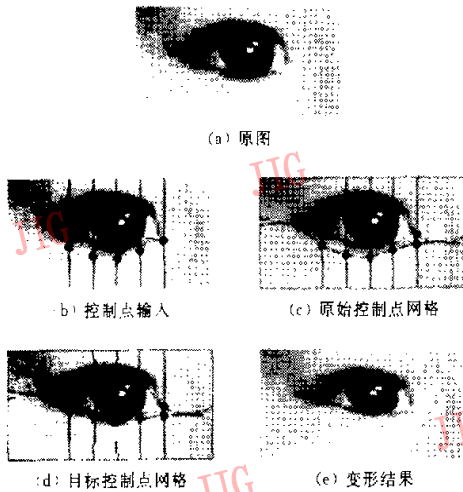


图 3 人眼变形示例

5 讨论

为了提高变形过程中的运算速度,本文还采取了以下几项措施:

(1) 控制点插值的局部化. 由于改变控制点的位置只能够影响到该控制点附近的区域,因此在实现过程中只对移动位置的控制点所在的行和列进行插值更新,而且其效果与全局插值一样好。

(2) 图象灰度插值的局部化. 由于只是图象的局部发生变化,因此只需要对发生变化的局部图象区域进行插值更新,而不必对整幅图象进行重建,这不仅提高了运算速度,同时在运算过程中也节省了内存空间。

(3) 图象灰度插值方法的改进. 由于采用了空间可变线性插值方法,因此在保证插值效果的同时还节省了运算速度. 该方法与双线性插值方法在运

算速度上的比较可参考文献[3].

综上所述,本文采用光滑不等距插值来对原始图象和目标图象进行坐标变换,并用空间可变线性灰度插值来对图象进行重建,从而实现了基于控制点网格的图象变形. 本文由于将图象的坐标变换和灰度插值分离开来,从而避免了图象行和列的两次插值运算,同时还采取了适当的措施来提高运算速度,并已获得了好变形效果. 本文将该方法应用到人眼变形中,不仅解决了人眼变形中的一些难题,还取得了很好的变形结果,从而为人眼变形提供了一种较为实用的方法。

参考文献

- 1 崔屹. 数字图象处理技术与应用[M]. 北京:电子工业出版社,1997.
- 2 徐士良. FORTRAN 常用算法程序集[M]. 北京:清华大学出版社,1995.
- 3 Giovanni Ramponi. Warped distance for space variant linear image interpolation[J]. IEEE Trans. Image Processing, 1999, 8(5): 629~639.
- 4 Dwayne Phillips. Image processing in C. Part 14: Warping and Morphing[J]. C++ Users Journal, 1995, (10): 55~65.
- 5 周孝宽. 实用微机图象处理[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1994.



杨金钟 1998年毕业于中国科学技术大学电子工程与信息科学系,现为中国科学技术大学电子工程与信息科学系硕士研究生,主要研究方向为图象处理、模式识别以及多媒体技术。



刘政凯 1964年毕业于中国科学技术大学无线电遥控遥测专业,现为中国科学技术大学教授,博士生导师,主要从事遥感图象处理、人工神经网络及模式识别方面的研究,已发表论文 60 余篇,出版专著 5 本。



俞能海 1992年获清华大学电子工程系工学硕士学位,现为中国科技大学副教授,在职博士生,目前主要研究方向为图象处理与模式识别、遥感与地理信息系统的一体化技术、多媒体技术,发表论文近 20 篇。



吴皓 2000年毕业于中国科学技术大学电子工程与信息科学系,现为中国科学技术大学电子工程与信息科学系通信与信息系统专业硕士研究生。