

运动模糊图像的降质过程分析与恢复技术研究

张秉仁 陈里铭 高游

(吉林大学电子科学与工程学院电子与电气工程系, 长春 130026)

摘要 在获取图像的过程中,由于被摄物与成像系统产生相对运动,使得图像的像素并不代表该点的实际灰度,而是—定范围内相邻像素灰度值的叠加。为了有效地恢复运动模糊图像,从像素运动的角度分析了因运动造成的图像模糊的实际过程,并首先揭示了运动造成图像降质的内在原因,然后根据模糊图像像素间的关系建立了一维和二维由匀速直线运动所造成的模糊图像的模糊模型,并依据图像降质过程的逆过程推导出恢复模型。为验证该模糊图像恢复技术的效果,对匀速直线运动造成的图像模糊进行了模拟和恢复实验,取得了令人满意的效果,尤其对字母的恢复,效果更好。另外,对边界像素问题还进行了专门的讨论,同时对恢复过程中产生误差的原因也进行了分析,最后总结了该算法的优越性和需要进一步改进的问题。

关键词 像素运动 降质原因 模糊模型 恢复模型 一维运动 二维运动

中图法分类号: TP317.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)07-0815-05

Analyse of Debasing Process and Restoring Technique for Motion-blurred Image

ZHANG Bing-ren, CHEN Li-ming, GAO You

(Ji Lin University, Department of Electronic Science and Electronic Engineering, Changchun 130026)

Abstract In acquiring image, due to the relative motion between an imaging system and its objects, the every value of grey scale of pixels expresses several ones within area instead of itself one pixel. It, thereby, results in imaging degrading, and engenders blurring imaging. The paper analyses a real process about image blurred as a result of object motion, reveals an intrinsic cause about image-degraded owing to object motion, and establishes blurring-model by which one dimension and two dimensions uniform velocity rectilinear motion result in image blurred abide. Based on result of blurring imaging pixel motion, the writers introduce a restoring model of blurring imaging from reverse process of degrading-process and conclude a restoring technique of motion blurring imaging from it. As an instance, the paper models a blurring process for uniform velocity rectilinear motion and restores it again. The example conforms the technique is available, especially for restoring characters and texts. A special discuss on boundary pixel problem is given. An analyse about error cause in process of restoring is introduced. In the end, the method's advantage and disadvantage and how to improve on it were discussed.

Keywords pixel motion, degrading cause, blurring model, restoring model, single dimension motion, two dimension motion

1 引言

运动模糊图像的恢复是图像处理的一大难题,其原因在于图像模糊的成因复杂,加之图像的损伤较大。在图像拍摄记录的过程中,由于被摄物与成像系统产生相对运动造成图像降质而导致的图像模糊称为运动模糊。研究其恢复技术具有重要意义,以往数字图像处理许多值得注意的成就都是在这一领域

取得的,其中由匀速直线运动所造成的图像模糊更具有—般性和代表性^[1],因为变速的、非直线的运动在成像瞬间可以视为匀速直线运动。

图像恢复可在空间域进行,也可在频率域进行^[2],其中空间域图像恢复比较简单,因其不涉及系统转移函数,仅是根据运动模糊的逆过程直接进行恢复,而且当移动的像素数刚好为整数时,情况最为简单;当移动的像素数不刚好为整数时,则需采用四舍五入的近似法进行恢复,人们通常用与之最接近的整数来讨论^[3]。常用的运动

模糊图像恢复方法有差分恢复、维纳滤波、逆滤波、约束去卷积、最小二乘方法等等。这些方法的共同特点是先把退化过程模型化,然后再从相反的过程恢复出原图像^[4],且大多数的恢复方法都是基于滤波原理。

研究由于运动所造成的图像模糊的机理,揭示其降质的内在原因是问题的核心与关键所在,本文提出一种基于像素运动的分析和恢复方法,即从像素运动的角度分析运动图像的模糊过程,并构造模糊模型,进而得出相应的恢复算法。另外还用计算机来模拟因运动而造成的图像模糊过程,并用该算法进行恢复,以验证其正确性,并分析和总结了恢复过程中产生误差的原因以及该算法的优越性。

2 运动模糊图像的降质过程分析

一般运动图像成像瞬间可以看成是匀速的直线运动,如果将目标划分成像素单元来研究,并弄清单

1)	$f(i,j-3)$	$f(i,j-2)$	$f(i,j-1)$	$f(i,j)$	$f(i,j+1)$	$f(i,j+2)$	$f(i,j+3)$
2)	$f(i,j-4)$	$f(i,j-3)$	$f(i,j-2)$	$f(i,j-1)$	$f(i,j)$	$f(i,j+1)$	$f(i,j+2)$
3)	$f(i,j-5)$	$f(i,j-4)$	$f(i,j-3)$	$f(i,j-2)$	$f(i,j-1)$	$f(i,j)$	$f(i,j+1)$
4)	$f(i,j-6)$	$f(i,j-5)$	$f(i,j-4)$	$f(i,j-3)$	$f(i,j-2)$	$f(i,j-1)$	$f(i,j)$
↓							
5)	$g(i,j-3)$	$g(i,j-2)$	$g(i,j-1)$	$g(i,j)$	$g(i,j+1)$	$g(i,j+2)$	$g(i,j+3)$

图1 一维运动情况的像素运动过程分解

2.2 二维运动模糊图像的降质过程分析

现以运动方向与水平方向夹角 $45^\circ \leq \alpha < 90^\circ$, $A=3, a=4$ 为例来分析目标图像以运动方向与水平方向夹角 $\alpha < 90^\circ$, 且向右上方运动的模糊过程。目标图像在做二维运动时,除图片的边界外,每一个像素的运动是相同的,其运动结果如表1所示,其中, $f(i, j)$ 表示原图片第 i 行,第 j 列的像素灰度值,1)、2)、3)、4)表示的是 (i, j) 像素位置上第1、第2、第3和第4时段的灰度值。 $g(i, j)$ 表示像素运动后,4个像素叠加造成的模糊图片第 i 行,第 j 列像素的等效灰度值。由此可见,运动模糊图像实际上是运动方向上各像素叠加造成的^[5]。

3 运动图像的模糊模型

3.1 水平向右运动图像的模糊模型

$a=4$ 时, $f(i, j)$ 所对应像素位置的灰度值变化

个像素的运动性质,那么它们的集合即是目标图像的运动状况。假设目标图像在曝光期间移动的像素数为整数,并定义如下变量:

a 为在曝光期间目标图像移动的像素数;

W 为图片的宽度(以像素数来表示);

H 为图片的高度(以像素数来表示);

A 为运动方向与水平方向夹角 α 的正切值的绝对值,即 $A = |\tan \alpha|$ 。

2.1 一维运动模糊图像的降质过程分析

目标图像的运动是一个连续的过程,而图像是以离散的像素表示的。根据前提假设,每个像素在运动过程中经过(或停留在)相邻像素位置的时间是相等的。图1所示为第 i 行像素的水平向右运动的示例。假设目标图像在曝光期间移动了4个像素,则图示的前4行表示第 i 行像素在不同的时间灰度值的变化情况;第5行代表第 i 行像素移动4个像素,并叠加后所得到的模糊图像的等效灰度值。

过程为

$$f(i, j) \rightarrow f(i, j-1) \rightarrow f(i, j-2) \rightarrow f(i, j-3) \quad (1)$$

由于像素在途经每个位置时的曝光时间相等,所以

$$g(i, j) = \frac{1}{4} [f(i, j) + f(i, j-1) + f(i, j-2) + f(i, j-3)] \quad (2)$$

那么, i, j 的取值范围如何呢?这就涉及到了边界问题。在目标图像向右水平运动的情况下,显然是图片的左边界问题,如 $j < 3$ 时, $j-3 < 0$,就无法取到 $f(i, j-3)$,而取到的只是所摄取的目标图像边界外的值,可见这些像素的灰度值是不确定的。当出现此情况时,可用所求像素的原像素值来代替,例如,求 $g(i, 2)$ 时, $f(i, -1)$ 用 $f(i, 2)$ 代替,即

$$g(i, 2) = \frac{1}{4} [f(i, 2) + f(i, 0) + f(i, 1) + f(i, 2)] \quad (3)$$

推广至 a 取整数的一般情况,就可以得到如下向右水平运动图像基于像素分析的模糊模型

表 1 二维运动情况的像素运动模糊结果表

	$j-1$	j	$j+1$
i	1) $f(i, j-1)$ 2) $f(i-1, j-1)$ 3) $f(i-2, j-1)$ $g(i, j-1)$ 4) $f(i-3, j-2)$	1) $f(i, j)$ 2) $f(i-1, j)$ 3) $f(i-2, j)$ $g(i, j)$ 4) $f(i-3, j-1)$	1) $f(i, j+1)$ 2) $f(i-1, j+1)$ 3) $f(i-2, j+1)$ $g(i, j+1)$ 4) $f(i-3, j)$
$i-1$	1) $f(i-1, j-1)$ 2) $f(i-2, j-1)$ 3) $f(i-3, j-1)$ $g(i-1, j-1)$ 4) $f(i-4, j-2)$	1) $f(i-1, j)$ 2) $f(i-2, j)$ 3) $f(i-3, j)$ $g(i-1, j)$ 4) $f(i-4, j-1)$	1) $f(i-1, j+1)$ 2) $f(i-2, j+1)$ 3) $f(i-3, j+1)$ $g(i-1, j+1)$ 4) $f(i-4, j)$
$i-2$	1) $f(i-2, j-1)$ 2) $f(i-3, j-1)$ 3) $f(i-4, j-1)$ $g(i-2, j-1)$ 4) $f(i-5, j-2)$	1) $f(i-2, j)$ 2) $f(i-3, j)$ 3) $f(i-4, j)$ $g(i-2, j)$ 4) $f(i-5, j-1)$	1) $f(i-2, j+1)$ 2) $f(i-3, j+1)$ 3) $f(i-4, j+1)$ $g(i, j+1)$ 4) $f(i-5, j)$
$i-3$	1) $f(i-3, j-1)$ 2) $f(i-4, j-1)$ 3) $f(i-5, j-1)$ $g(i-3, j-1)$ 4) $f(i-6, j-2)$	1) $f(i-3, j)$ 2) $f(i-4, j)$ 3) $f(i-5, j)$ $g(i-3, j)$ 4) $f(i-6, j-1)$	1) $f(i-3, j+1)$ 2) $f(i-4, j+1)$ 3) $f(i-5, j+1)$ $g(i-3, j+1)$ 4) $f(i-6, j)$

$$g(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{a} \sum_{n=0}^{a-1} f(i, j-n), a-1 \leq j < W, \\ 0 \leq i < H \\ \frac{1}{a} \left[\sum_{n=0}^j f(i, j-n) + (a-j-1)f(i, j) \right] \\ 0 \leq j < a-1, 0 \leq i < H \end{cases} \quad (4)$$

其中 n 为像素移动变量。

3.2 运动方向与水平方向夹角 $\alpha < 90^\circ$, 且向右上方运动图像的模糊模型

$A=3, a=4$ 情况下, 因为在曝光的 4 段时间里, 像素 (i, j) 的灰度值 $f(i, j)$ 变化为

$$f(i, j) \rightarrow f(i-1, j) \rightarrow f(i-2, j) \rightarrow f(i-3, j-1) \quad (5)$$

所以

$$g(i, j) = \frac{1}{4} [f(i, j) + f(i-1, j) + f(i-2, j) + f(i-3, j-1)] \quad (6)$$

推广至 a 取整数的一般情况, 可以得到以下运动方向与水平方向夹角 $45^\circ \leq \alpha < 90^\circ$, 且向右上方运动的模糊模型(除去边界)

$$g(i, j) = \frac{1}{a} \sum_{n=0}^{a-1} f\left(i-n, j-\left[\frac{n}{A}\right]\right) \quad (7)$$

其中, n 为像素移动变量, $\left[\frac{n}{A}\right]$ 为向下取整。

4 运动模糊图像的递推恢复算法

4.1 水平向右运动模糊图像的恢复算法

恢复即是降质的逆过程。首先定义变量 $\hat{f}(i, j)$ 为经过恢复处理后 (i, j) 处的像素灰度值。然后将

式(4)中的两种情况分别考虑:
(1) $a-1 < j < W, 0 \leq i < H$ 不涉及边界像素情况

由式(4)得

$$ag(i, j) = \sum_{n=1}^{a-1} \hat{f}(i, j-n) + \hat{f}(i, j) \quad (8)$$

则可推出

$$\hat{f}(i, j) = ag(i, j) - \sum_{n=1}^{a-1} \hat{f}(i, j-n) \quad (9)$$

(2) $0 \leq j < a-1, 0 \leq i < H$ 涉及边界像素的情况
由式(4)得

$$ag(i, j) = \hat{f}(i, j-n) + (a-j-1)\hat{f}(i, j) \quad (10)$$

当推广至 a 取整数的一般情况, 则

$$\hat{f}(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{a-j} \left[ag(i, j) - \sum_{n=0}^j \hat{f}(i, j-n) \right] \\ 0 < j < a-1, 0 \leq i < H \\ g(i, j) \quad j=0 \quad 0 \leq i < H \end{cases} \quad (11)$$

综合上述两种情况, 即可得到以下水平向右运动的模糊图像的恢复模型

$$\hat{f}(i, j) = \begin{cases} g(i, j) \quad j=0 \quad 0 \leq i < H \\ \frac{1}{a-j} \left[ag(i, j) - \sum_{n=1}^j \hat{f}(i, j-n) \right] \\ 0 < j < a-1, 0 < i < H \\ ag(i, j) - \sum_{n=1}^{a-1} \hat{f}(i, j-n) \\ a-1 \leq i < W, 0 \leq j < H \end{cases} \quad (12)$$

其他方向的恢复模型只需在水平向右匀速直线运动恢复的基础上, 作以适当的改动即可得到。

4.2 运动方向与水平方向的夹角 $\alpha < 90^\circ$ 且向右上方运动模糊图像的恢复算法

对于此种情况的运动模糊图像恢复,可同样定义变量 $\hat{f}(i, j)$ 为经过恢复处理后 (i, j) 处像素的灰度值,以运动方向与水平方向夹角 $45^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ 情况为例来说明该算法。当在非边界情况下,由式(7)得

$$ag(i, j) = \sum_{n=1}^{a-1} \hat{f}(i-n, j - \lfloor \frac{n}{A} \rfloor) + \hat{f}(i, j) \quad (13)$$

则运动方向与水平方向夹角 $\alpha < 90^\circ$ 且向右上方运动模糊图像的恢复模型为

$$\hat{f}(i, j) = ag(i, j) - \sum_{n=1}^{a-1} \hat{f}(i-n, j - \lfloor \frac{n}{A} \rfloor) \quad (14)$$

其他方向二维运动图像的模糊模型与恢复算法可照此方法进行推导。

5 边界像素问题讨论

由于运动会造成目标图像边界像素数据不完整,且图片边界以外的像素将被摄取进来并叠加,致使图像模糊,因此其取值是无法估计的。经过反复试验表明,采用像素替代法,即用当前像素灰度值代替无法取到的值是可行的。

水平一维运动的边界像素问题容易讨论,其上述模糊模型和恢复算法前面已表达清楚,二维运动

情况需进一步讨论,因在二维运动中,边界有两个。对于运动方向与水平方向夹角 $\alpha < 90^\circ$ 且向右上方运动的模糊情况,需要注意的是左边界和下边界。如当 $j=0$ 或 $i-3 < 0$ 时,像素灰度值 $f(i-1, j)$ 、 $f(i-2, j)$ 、 $f(i-3, j)$ 中就存在取不到的值。例如求 $g(1, 1)$ 时, $f(-1, 1)$ 和 $f(-2, 0)$ 均只能用 $f(1, 1)$ 代替,即

$$g(1, 1) = \frac{1}{4} [f(1, 1) + f(0, 1) + f(1, 1) + f(1, 1)] \quad (15)$$

由于二维运动图像的边界像素模糊模型涉及到行列坐标的溢出问题,因此推导一般意义上的数学表达式较困难,但只要理解了其边界处理方法,在程序实现中仍可以将其很好地表达出来。图片恢复时,可按运动方向与水平方向夹角正切值 A 和曝光时间内目标图像运动的像素数,再按逐个递减的方式将 $ag(i, j)$ 减去模糊过程中加入的非当前计算像素的灰度值即可实现恢复。

6 实验验证与误差分析

为了验证本文算法的效果,在 VC++6.0 环境下,先利用模糊模型模拟产生运动模糊图像,然后用恢复算法对图像进行了恢复实验。用小汽车、蝴蝶和字母的图像对上述理论进行验证的结果如图 2、图 3、图 4 所示。



(a) 原图

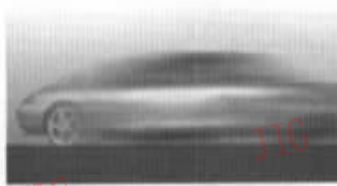
(b) $a=70$ 的水平模糊图像(c) $a=70$ 的恢复图像

图 2 小汽车图像的模糊与恢复



(a) 原图

(b) $a=20, A=22$ 的模糊图像(c) $a=20, A=22$ 的恢复图像

图 3 蝴蝶图像的模糊与恢复

IMAGE

(a)原图

IMAGE

(b) $a=70$ 的水平模糊图像

IMAGE

(c)图 4(b)的恢复图像

IMAGE

(d) $a=40, A=2$ 的模糊图像

IMAGE

(e) 图 4(d)的恢复图像

图 4 字母图像的模糊与恢复

恢复图片中存在噪声主要是因为计算过程中的数字舍入误差不断迭代累积所致,但这种误差是在空间域计算中不可避免的,因为图像的像素灰度值为整数,而计算过程中有除法运算,故使得有小数出现,舍去小数时就出现了舍入误差。颜色较单一的字符图像的恢复效果要相对好得多,因为处理过程分红、绿、蓝 3 个通道,其中一个或两个通道的灰度值为零,其最后的误差自然要减小,所以此算法在处理模糊字母时的效果更好。

7 结 论

由于上述模糊恢复模型是理想模型,没有考虑噪声影响,只是从像素运动的角度揭示了运动模糊图像的降质原因与恢复的基本过程,因此算法的恢复效果受曝光时间内运动的像素数 a 的影响较小。因为恢复算法是根据模糊模型反推其逆过程,所以该算法是可逆的。由于二维匀速直线运动的恢复算法存在一定的局限性,如计算机处理时不可避免的存在截断误差,所以曾尝试在恢复前对读取的模糊图像的像素值进行一定的修改,以尽量减少该截断误差的影响,但是由于图像各像素的相关性差,所以对像素截断误差的预测不准确,而且当某个像素的像素值误差较大时,由于迭代算法的影响,致使该误差会影响到其他像素,且随着迭代次数的增多,误差会越来越大,所以,该问题还有待进一步改进。

参 考 文 献

1 阮秋琦. 数字图像处理学(第 1 版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2001:311~316.

- 2 Gonzalez Rafael C, Woods Richard E. Digital image processing [M]. Second Edition, New York, USA: Addison-Wesley Pub Co, 2002:336~370.
- 3 黄贤武, 王加俊, 李家华. 数字图像处理与压缩编码技术[M]. 北京:电子科技大学出版社, 2000, 12.
- 4 王旭辉, 郭光亚. 匀速运动模糊图像的快速恢复[J]. 微计算机信息, 2000, 16(5):25~28.
- 5 孙农亮, 曹茂永. 运动图像模糊清晰度评价函数的研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(3)增刊:204~205.



张秉仁 1964 年生, 吉林大学电子科学与工程学院副教授, 2001 年毕业于吉林大学电子科学与工程学院, 获硕士学位, 现为吉林大学博士研究生。主要研究方向为图像处理、虚拟地理信息系统。
E-mail: bingrenz196419@sina.com



陈里铭 1975 年生, 2003 年获吉林大学电子科学与工程学院电子与电气工程系学士学位, 现为大连理工大学硕士研究生。主要研究方向为图像处理、图像传感器。



高游 1962 年生, 吉林大学电子科学与工程学院讲师, 1997 年获长春科技大学地球科学学院硕士学位, 现为吉林大学博士研究生。主要研究方向为科学计算可视化、图像处理。