

基于 Z 变换的局部匀速运动模糊图像恢复算法

黎明和¹ 何 斌¹ 岳继光¹ 秦健铭²

(¹ 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804; ² 岑溪市人才交流服务中心, 广西 岑溪 543200)

摘要 针对背景不变的局部匀速运动模糊图像复原问题, 提出一种基于 Z 变换的恢复算法。在前景和背景色差较大的假设前提下, 基于背景差方法将前景从图像中分离出来; 利用旋转矩阵将前景在像平面内任意方向的运动转换成 X 轴方向的运动; 进而把复杂的局部模糊恢复问题简化为前景模糊恢复及前景和背景融合两个子问题来解决, 使求解过程得到最大程度简化; 在严格的数学推导基础上建立基于 Z 变换的退化及恢复模型, 将模型中的差分方程转化为简单的代数方程求解; 仿真结果表明, 提出的算法能正确、有效并且快速地恢复由于局部匀速运动所造成的图像退化; 算法对模糊宽度的变化不敏感, 较维纳滤波恢复算法有一定的稳健性、优越性。

关键词 图像处理; 图像复原; Z 变换; 局部运动模糊图像

中图分类号 TP391.41 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092905.1193

Blurred Image Restoration of Local Uniform Motion Based on Z Transform

Li Minghe¹ He Bin¹ Yue Jiguang¹ Qin Jianming²

(¹ College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)
² Human Resource Center of Cenxi, Cenxi, Guangxi 543200, China)

Abstract A restoration algorithm of local uniform motion blurred image based on Z transform for invariant background motion image detection was proposed. Suppose the foreground and the background is easy to be separated from blurred image. Image foreground was extracted from blurred image based on background subtraction method. Other direction movement of image foreground in the image space was converted into X axis direction movement by rotation matrix. In order to simplify the complex restoration process of local-blurred image, the whole procedure was divided into two steps: 1) image foreground restoration; 2) integration of foreground and background. Restoration and degradation model was established based on Z transform by strict mathematical deduction. Difference equation was changed into algebraic equation to simplify the solving process. Simulation results shown that the proposed method can be restored blurred image of local uniform motion correctly, effectively and rapidly. The algorithm is not sensitive to fuzzy degree; have a certain stability and superiority compared to Wiener filter restoration algorithm.

Key words image processing; image restoration; Z transform; local-motion blurred image

1 引 言

随着机器视觉及计算机视觉技术的发展, 光学成像系统在运动目标的检测、识别及分析中的应用越来越广泛^[1]。传感器成像过程中, 记录介质积分时间内拍摄目标和摄像机之间的相对运动会造成图像的模

糊, 给后续运动图像的处理、分析带来一定的困难。运动模糊图像可分为以下两种: 一种是物像距离改变的相向运动造成的; 另一种是物面和像面之间的平行运动造成的。其中以后一种情况最为常见, 本文主要探讨后一问题。图像恢复常用方法有逆滤波法、维纳滤波法、约束去卷积法等^[2~8]。逆滤波方法虽然直

收稿日期: 2008-07-20; 收到修改稿日期: 2008-10-06

基金项目: 国家自然科学基金(50405045)、国家 863 计划(2007AA04Z253)和上海市启明星(05QMX1455)资助课题。

作者简介: 黎明和(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事仿生机器人、图像处理及模式识别等方面的研究。

E-mail: limingheliming@sina.com

导师简介: 岳继光(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂系统建模理论与仿真、数据处理与可视化技术、智能材料(磁流变)的控制等方面的研究。E-mail: yuejiguang@tongji.edu.cn

观、容易求解,但由于退化矩阵可能是不可逆的,因此直接运用逆滤波的方法可能存在病态性;维纳滤波能有效纠正恢复过程中的病态性问题,且对噪声有一定的抑制作用,但要求噪声的功率谱已知,且需要进行复杂的矩阵运算,实用性较差;约束去卷积法效果好,但运算量较大,且可能造成过度平滑效果,使图像质量有所下降。文献[9~11]提出了一种基于 Z 变换的匀速直线、旋转运动模糊图像快速恢复算法,该算法能将图像恢复运算中的差分方程转化为简单的代数方程,使求解过程大大简化,在提高运算速度的同时,复原图像质量也得到进一步的改善,但作者未给出算法的完整数学推导过程。

目前,几乎所有运动模糊图像恢复方法都是针对整个场景与图像传感器发生相对运动造成模糊的情况而设计的,而对于场景中只有部分对象(前景)与传感器发生相对位移造成模糊的情况(如常见的人体、昆虫、汽车等在静态场景中的运动),则研究得很少。本文在文献[9]的基础上,提出一种基于 Z 变换的主要针对局部匀速运动模糊图像恢复算法,并对退化及恢复模型进行更为严格、更为完整的数学推导。首先基于运动模糊图像退化原理及背景差方法将包含局部运动模糊的前景区域从整个场景图像中分离出来,把复杂的局部模糊问题转化为前景模糊恢复及前、背景叠加两个子问题来解决;然后通过旋转矩阵将像平面内任意方向的匀速运动转换为 X 轴方向的匀速运动,从而进一步简化了问题的求解,最后利用基于 Z 变换的恢复模型求解复原图像。

2 退化原理及过程

在运动检测过程中,假设运动目标的运动方向与像平面始终平行,一帧理想的清晰图像为原图像 $f(x, y)$,其中前景图为 $q(x, y)$ (在前景以外区域值为 0),背景图像为 $b(x, y)$ (前景区域值为 0),则

$$f(x, y) = q(x, y) + b(x, y), \quad (1)$$

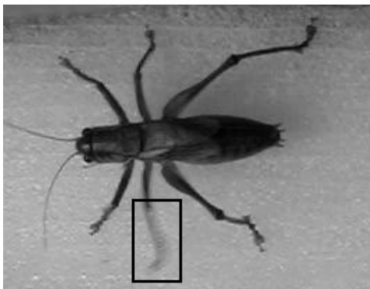


图 1 局部运动模糊图像

Fig. 1 Blurred image of local motion

$f(x, y)$ 经过一个退化过程 $h(x, y)$ (如光学系统的点扩展函数),假设在退化过程中背景部分保持不变,只有前景区域发生运动模糊,叠加一个加性噪声 $n(x, y)$ 后,得到一幅局部退化图像 $g(x, y)$ (如图 1),这一过程可描述为

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y), \quad (2)$$

式中 $*$ 表示卷积,为了简化运动模糊恢复问题,本文暂不考虑噪声的影响,将(1)式代入(2)式得

$$g(x, y) = [q(x, y) + b(x, y)] * h(x, y). \quad (3)$$

由于成像过程中,运动目标与传感器发生相对位移,而场景(背景)则保持不变,因此, $h(x, y)$ 的求解较为复杂,可将 $f(x, y)$ 的退化过程分解为下面两步:

1) $q(x, y)$ 在 $h^q(x, y)$ 作用下退化为 $g^q(x, y)$:

$$g^q(x, y) = q(x, y) * h^q(x, y). \quad (4)$$

如果在一次快门曝光时间内运动目标相对成像系统作匀速直线运动,则每个像素点 $p(i, j)$ 的值由多个采样点叠加而成。设总曝光时间为 T ,在 T 内运动对象移动了 N 个采样点,则每个采样点在某个像素点的曝光时间为 $1/T$,对该像素点 $p(i, j)$ 的影响因子为 $1/N$ (即对应 $h^q(i, j) = 1/N$),因此容易求得 $h^q(x, y)$ 。

2) $g^q(x, y)$ 与 $b(x, y)$ 叠加得到 $g(x, y)$:

$$g(x, y) = g^q(x, y) + \lambda(x, y) \times b(x, y), \quad (5)$$

式中 $\lambda(x, y)$ 为叠加因子,等于成像过程中 $b(x, y)$ 曝光时间 $T_{b(x, y)}$ 与总曝光时间 T 之比

$$\lambda(x, y) = T_{b(x, y)} / T. \quad (6)$$

3 基于 Z 变换的前景退化及恢复模型

3.1 退化模型

设前景图像 $q(x, y)$ 在像平面内作匀速直线运动,运动方向与 X 轴成 θ 角,速度为 v ,曝光时间为 T ,则成像后可得到模糊图像 $g^q(x, y)$

$$g^q(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T q[x - v(t) \cos \theta, y - v(t) \sin \theta] dt. \quad (7)$$

为了简化模型,将 $q(x, y)$ 沿逆时针方向绕原点旋转 θ 角得到 $q'(x, y)$,如图 2 所示,使 $q'(x, y)$ 的运动方向与 X 轴方向相同

$$q'(x^*, y^*) = q(x, y) \times \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (8)$$

在不引起混淆的情况下可将 $q'(x^*, y^*)$ 改写为 $q'(x, y)$,由图 2 分析可知,经过旋转后,前景图像

在 Y 轴方向的运动分量已被转换到 X 轴方向,因此, (7) 式可进一步转化为

$$g'(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T q'[x - v(t), y] dt. \quad (9)$$

设每贴图像的总曝光时间 T 内运动对象移动 N 个采样点,则有: $N = v \times T$, 图像经过采样转化为离散图像 $q'(n)$

$$g'(n) = q'(n) * h(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} q'(n - i). \quad (10)$$

(10) 式的物理意义为模糊路径上任一像素点模糊后的灰度值是该像素点及其前面 $N - 1$ 个像素点的原灰度值的加权累积, N 为模糊宽度,用像素数来表示,并且有 $N \geq 1$. 设 $G'(z)$ 及 $Q'(z)$ 分别为 $g'(n)$ 及 $q'(n)$ 的 Z 变换,对(10) 式进行 Z 变换后得

$$G'(z) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} Q'(z - i). \quad (11)$$

由 Z 变换的移位性质得

$$G'(z) = \frac{1}{N} [Q'(z) + Q'(z)z^{-1} + Q'(z)z^{-2} + \dots + Q'(z)z^{-N+1}], \quad (12)$$

对(11)式进一步整理得到前景图像运动模糊的退化模型为

$$H'(z) = \frac{G'(z)}{Q'(z)} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} z^{-k} = \frac{1 - z^{-N}}{N(1 - z^{-1})}, \quad 0 < |z| \leq \infty \quad (13)$$

退化模型 $H'(z)$ 及 $G'(z)$ 本身均存在零点,这将导致

系统产生振荡,形成病态系统,应选择 $H'(z)$ 的收敛域,避开其零点的影响,使系统得到满意的解。

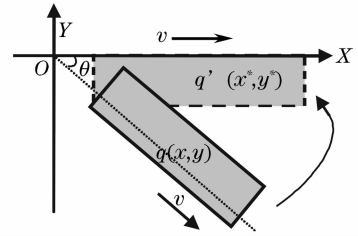


图 2 前景图像旋转

Fig. 2 Rotation of image foreground

3.2 恢复模型

在假设的条件不变的情况下,前景图像的恢复是退化的逆过程.(13)式可整理为

$$Q'(z) = N \times [G'(z) - z^{-1}G'(z)] + z^{-N}Q'(z), \quad (14)$$

对式(14)进行 Z 逆变换得

$$q'(n) = N \times [g'(n) - g'(n - 1)] + q'(n - N), \quad (15)$$

式中 $g'(n)$ 由 $g^a(x, y)$ 绕 Z 轴沿逆时针方向旋转 θ 度后经离散化得到,而综合(5) 式、(6) 式可求出 $g^a(x, y)$

$$g^a(x, y) = g(x, y) - \frac{T_{b(x, y)}}{T} \times b(x, y). \quad (16)$$

假设模糊图像中的前景图与背景图的像素差较大,且前景在像平面内以速度 v 沿着 X 轴方向平行移动(图 3),设 $p(i, j)$ 为 $g(x, y)$ 像平面区域中任一点,则 $T_{b(i, j)}/T$ 的值可通过(17) 式求取

$$\frac{T_{b(i, j)}}{T} = \begin{cases} 1, & p(i, j) \in g(x, y) \Delta p(i, j) \notin g^a(x, y) \\ d/N, & p(i, j) \in g^a(x, y) \Delta p(i, j) \notin q(x, y) \\ (N - d)/N, & p(i, j) \in g^a(x, y) \Delta p(i, j) \notin q(x, y) \Delta d < N \\ 0, & p(i, j) \in q(x, y) \end{cases} \quad (17)$$

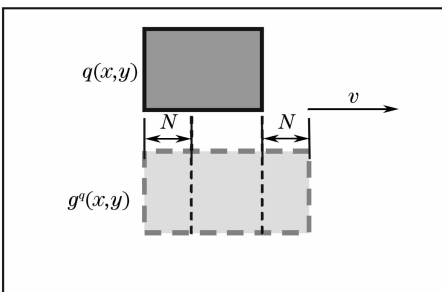


图 3 局部运动模糊示意图

Fig. 3 Blurred image diagram of local motion

式中 $d = \min(d_1, d_2)$, d_1, d_2 分别为点 $p(i, j)$ 到 $g^a(x, y)$ 区域左右边缘的最短距离。

因此,只要给定初始条件,就可以根据以上的恢复模型,由(15)式将 $g'(x, y)$ 恢复为 $q'(x, y)$,再利用式(18) 将 $q'(x, y)$ 绕 Z 轴沿顺时针旋转 θ 度得到 $q(x, y)$,最后由(1) 式可求得原图像 $f(x, y)$

$$q(x, y) = q'(x', y') \times \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (18)$$

4 仿真结果及分析

使用 C++ 实现本文算法,在 Intel Pentium TM 2.0 GHz CPU, 2 GB 内存的计算机上运行。为了检验本文算法的有效性,对局部匀速运动模糊图像的退化及恢复过程进行了仿真,选择的原图为 640 pixel × 480 pixel 的清晰灰度图[见图 4(a)],仿真实验的具体过程如下:

1) 根据(4)式,(5)式对图 4(a)进行局部运动模糊的退化仿真,设前景(人)在总曝光时间 T 内移动 $N=35$ 个像素点,即 $N=vT=35$, v 恒定,背景保持不变,得到局部模糊图像[图 4(b)]。

2) 由于仿真实验中选择的是前、背景像素灰度差较大的图像,因此,基于经典的背景差方法和(16)式提取出图 4(b)的前景区域,得到包含前景运动模糊的图像[图 4(c)],并且,为了简化后续的恢复过程,将图 4(c)中的非前景区域像素置 0。

3) 利用本文提出的恢复算法对局部模糊图像进行恢复处理,得到如图 4(d)所示的效果。

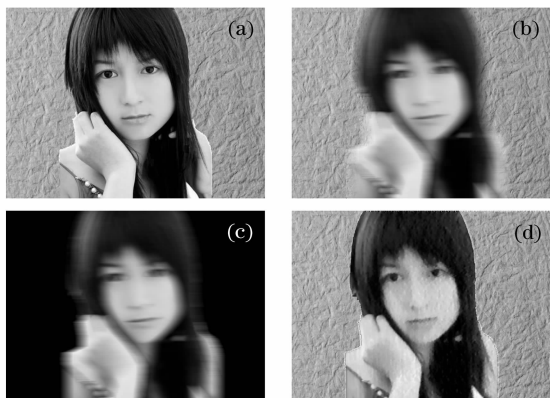


图 4 局部运动模糊图像的退化及恢复($N=35$)。(a)原始清晰图像;(b)局部退化图像;(c)前景提取结果;(d)恢复结果

Fig. 4 Degradation and restoration of blurred image of local motion. (a) original clear image; (b) local degradation image; (c) result of image foreground extraction; (d) restoration result

从仿真结果来看,本文的算法能正确、有效地恢复由于局部匀速运动所造成的图像退化,复原图像轮廓清晰,对比明显,虽然与原图相比质量有所下降,但相对模糊图像,图像质量有了很大提升;恢复算法只对背景区域产生轻微影响;由于本文核心算法只需要进行两次累加乘法和一次加法,因此,恢复速度较快,运动时间一般小于 0.1 s,接近实时要求。

为了进一步从客观方面评价图像恢复算法,本文用改善信噪比(R_{ISN})作为复原图像的质量改善的

客观评价指标。设 $f(x,y), g(x,y), \hat{f}(x,y)$ 分别为原始图像、前景运动模糊图像及复原图像。ISNR 由下式计算

$$ISNR = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{x,y} \|f(x,y) - g(x,y)\|^2}{\sum_{x,y} \|f(x,y) - \hat{f}(x,y)\|^2} \right\}. \quad (19)$$

分别用本文算法及维纳滤波法对 $N=vT=15$ [图 6(a)], $N=25$ [图 6(d)], $N=35$ [图 6(g)], $N=50$ [图 6(j)] 的前景局部模糊图像进行恢复计算,恢复结果分别如图 6 所示,图 6(b),图 6(e),图 6(h),图 6(k) 为本文算法的复原结果,图 6(c),图 6(f),图 6(i),图 6(l) 为维纳滤波法的复原结果。利用(19)式计算复原图像的 R_{ISN} 值,结果如图 5 所示。

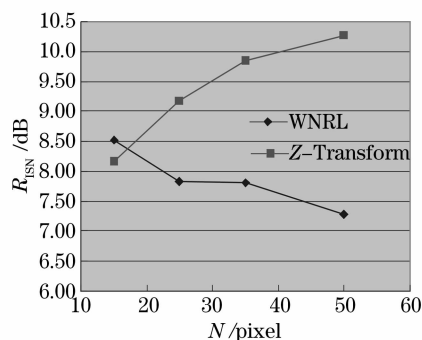


图 5 复原图像 R_{ISN} 折线图

Fig. 5 Improved signal-to-noise ratio line graph of restored images

从复原图像及图 5 中可以看出:

1) 本文算法具有较强的稳健性,对取不同 N 值的模糊图像都能有较好的恢复效果。

2) 复原图像较模糊图像的质量有了明显提升, R_{ISN} 值均大于 8 dB,当 N 较小时,维纳滤波效果略好于本文算法,但当 N 值持续增大时,本文算法的图像质量改善效果明显优于维纳滤波法;对于维纳滤波法,复原图像的质量随 N 越大, R_{ISN} 值有所下降,而本文算法恰恰相反, N 越大,图像改善效果越明显。

3) 随着 N 的增加,复原图像的质量有所下降,这可能是由于在计算过程中,数字舍入误差不断迭代累积所致。

4) 复原图像左边区域较右边区域质量好,这是由于恢复模型本身“迭代特性”所决定的,前面的像素点受到噪声影响,将有可能对后续像素点的恢复带来影响,对此,本文在恢复的同时加入了一个平滑滤波算子,达到了较好效果。



图 6 前景模糊图像恢复结果。(a),(d),(g),(j)分别为 N 等于 15,25,35,50 时的模糊图像；(b),(e),(h),(k)分别为 $N=15,25,35,50$ 时本文算法的恢复结果；(c),(f),(i),(l)分别为 $N=15,25,35,50$ 时维纳滤波的恢复结果

Fig. 6 Restoration results of blurred image of foreground. (a),(d),(g),(j) are the blurred images corresponding to that N equal 15,25,35,50; (b),(e),(h),(k) are the restored results corresponding to that N equal 15,25,35,50 using proposed algorithm; (c),(f),(i),(l) are the restored results corresponding to that N equal 15,25,35,50 using WNRL.

5 结 论

本文针对像平面内任意方向的局部匀速运动造成的图像模糊,提出了基于 Z 变换的局部模糊图像恢复算法,并进行了严格的数学推导。该算法根据局部模糊图像特性,把复杂的局部模糊问题简化为前景模糊恢复及前、背景叠加两个相对简单的子问题来解决,并且把差分方程转化为简单的代数方程求解。最后的仿真结果验证了本文算法的正确性,能有效、快速地恢复图像退化;与维纳滤波恢复算法进行了比较,结果表明本文算法的稳健性和优越性。局部运动模糊是运动图像采集过程中一种常见现象,因此,本文算法在光学成像系统、运动目标检测等相关领域有着重要的理论及实际应用价值。

参 考 文 献

- Ming Ying, Jiang Jingjie. Background modeling and moving-objects detection based on cauchy distribution for video sequence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 587~592
- 明 英,蒋晶珏. 基于柯西分布的视频图像序列背景建模和运动目标检测[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 587~592
- Han Chaoyang. Investigation on Restoration of Rotational Motion Blurred Image and Video Stabilization[D]. Master's dissertation of Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008. 16~41
- 韩超阳. 旋转运动模糊图像复原及电子稳像技术研究[D]. 上海: 上海交通大学硕士学位论文, 2008. 16~41
- Hong Hanyu, Zhang Tianxu. Restoration algorithm for rotational motion blurred images with non-zero boundary[J]. *J. Image and Graphics*, 2004, **9**(3): 265~274
- 洪汉玉,张天序. 非零边界旋转运动模糊图像的恢复算法[J]. *中国图象图形学报*, 2004, **9**(3): 265~274
- Yin Bing, Wang Yanbin, Liu Wei. Blur identification of the degraded images by neural network[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(1):

138~140

- 尹 兵,王延斌,刘 威. 用神经网络鉴别退化图像的模糊类型[J]. *光学技术*, 2006, **32**(1): 138~140
- Li Lunbo, Ma Guangfu. Identification of degraded traffic sign symbols using PNN[J]. *J. Electronics & Information Technology*, 2008, **30**(7): 1703~1707
- 李伦波,马广富. 基于 PNN 的退化交通标志图像的识别算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2008, **30**(7): 1703~1707
- Deng Zefeng, Xiong Youlun. Identification of motion-blur direction based on frequency-domain algorithm [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(10): 98~101
- 邓泽峰,熊有伦. 基于频域方法的运动模糊方向识别[J]. *光电工程*, 2007, **34**(10): 98~101
- Chen Xichun, Cao Fengmei, Jin Weiqi. Recursive model of forward motion blurred image based on polar coordinates[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 552~556
- 陈喜春,曹峰梅,金伟其. 基于极坐标的相向运动图像模糊的递归模型[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 552~556
- Meng Qinghao, Zhou Rongbiao. Research on restoration of composite-frame images degraded by motion [J]. *Computer Engineering*, 2006, **32**(13): 187~189
- 孟庆浩,周荣彪. 复合帧运动模糊图像复原方法研究[J]. *计算机工程*, 2006, **32**(13): 187~189
- Di Hui, Yu Qifeng. Rapid restoration of images blurred by uniform linear motion based on Z transform[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(6): 884~889
- 邸 慧,于起峰. 基于 Z 变换的匀速直线运动模糊图像的快速恢复[J]. *光学技术*, 2005, **31**(6): 884~889
- Di Hui, Ding Xiaohua, Yu Qifeng. Restoration of uniform rotation motion blurred images based on Z transformation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(4): 89~92
- 邸 慧,丁晓华,于起峰. 基于 Z 变换匀速旋转运动模糊图像的快速恢复[J]. *光电工程*, 2006, **33**(4): 89~92
- Di Hui, Yu Qifeng. Autocorrelation based identification the blur extent of uniform motion blurred images[J]. *J. National University of Defense Technology*, 2006, **28**(5): 123~125
- 邸 慧,于起峰. 基于自相关的匀速运动模糊尺度参数识别[J]. *国防科技大学学报*, 2006, **28**(5): 123~125