

文章编号 1004-924X(2012)06-1389-09

双 CMOS 成像系统中运动模糊图像的复原

范赐恩¹, 陈曦^{2*}, 张立国³, 张虎¹, 邓德祥¹

(1. 武汉大学电子信息学院, 湖北武汉 430072; 2. 武汉大学微电子与信息技术研究院, 湖北武汉 430072;
3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘要:为获取高空间分辨率的清晰图像,设计了一种双 CMOS 成像系统。该系统的两片 CMOS 传感器可同时获取相同场景的图像,其中一片 CMOS 传感器获取高帧率、低空间分辨率的图像序列;另一片 CMOS 传感器获取低帧率、高空间分辨率的运动模糊图像。首先,通过光流法计算高帧率、低空间分辨率 CMOS 传感器获取图像序列的全局运动路径,在能量守恒和能量与积分时间成正比 2 个约束条件下估计运动模糊核初始值,通过贝叶斯准则交替迭代优化运动模糊核。最后,利用 TV-L1 方法从低帧率、高空间分辨率 CMOS 传感器获取的模糊图像中快速、有效地恢复出清晰图像。仿真和实验结果表明:有 38% 以上的仿真图像复原结果误差率小于 2,且受噪声影响小,复原图像的振铃小。另外,能有效去除实拍图像的空间移不变运动模糊。

关键词:运动模糊;运动轨迹估计;模糊核;CMOS 传感器;图像复原

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122006.1389

Restoration of motion blurred image in dual CMOS imaging system

FAN Ci-en¹, CHEN Xi^{2*}, ZHANG Li-guo³, ZHANG Hu¹, DENG De-xiang¹

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Institute of Microelectronics and Information Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
* Corresponding author, E-mail: robertcx@whu.edu.cn

Abstract: To obtain high spatial resolution images, a imaging system with two CMOSs was designed to acquire the same scene images simultaneously. Among them, one CMOS sensor was used to acquire high frame rate, low spatial resolution image sequences, and the other one to acquire low frame rate, high spatial resolution images. Firstly, the global motion path was obtained by computing the high frame rate, low resolution image sequences acquired by the CMOS sensor using optical flow method. Then, under the constraint conditions of energy conservation and the energy to be proportional to integration interval, the initial motion blur kernel was estimated and motion blur kernel was optimized by using alternating iterative method based on Bayesian criterion. Finally, a sharp image was restored quickly and effectively from the low frame rate, high spatial resolution blur image acquired by the CMOS sensor using TV-L1 algorithm.

收稿日期:2012-02-08;修订日期:2012-03-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61072135)

Simulation and experiment results indicate that more than 38% simulation images show their error ratios to be less than 2, and has little affected by noises. Restored images have smaller ringing artifacts, and the space-invariance motion blurred photographs can be deblurred effectively.

Key words: motion blur; motion path estimation; blur kernel; CMOS sensor; image restoration

1 引言

运动模糊是积分时间内相机和拍摄场景间相对运动的结果,它会造成图像质量的降低。许多情况下运动模糊是不可避免的,如积分时间内手持相机的抖动^[1]、场景中目标的运动^[2-3]以及空间遥感相机拍摄期间卫星沿轨道飞行及地球自转产生的相对运动^[4-5]等都会产生运动模糊图像。运动模糊图像的复原是一个病态问题,因此对该问题采用不同的约束条件进行建模、优化是一个极具挑战的任务。近年来对运动模糊的复原已成为计算机视觉和图形学领域的研究热门,并取得了一定进展^[6-8]。

Fergus 等人^[6]利用自然图像的梯度满足重尾分布这一统计特性,采用贝叶斯方法估计运动模糊核,并采用 Richardson-Lucy 方法^[9]复原模糊图像。Qishan 等人^[7]利用模糊图像的低对比度区域作为图像复原的一种平滑约束,该约束可有效抑制复原图像的振铃效应,提高复原图像的质量。Lixu 等人的研究^[8]发现强边缘不一定对核估计有利,提出了一种用筛选后的有效边缘估计模糊核的方法,并用 TV-L1 方法来进行解卷积,复原速度快、效果比较好。图像传感器在一定时间内对光能量积分得到一幅图像,图像传感器的空间分辨率与积分时间成正比,即图像传感器的空间分辨率越高,需要的积分时间越长,运动模糊越严重^[10]。针对高空间分辨率的运动模糊图像,本文设计了一套双 CMOS 传感器成像系统,提出了一种根据运动轨迹估计运动模糊核初始值的方法,避免了迭代估计中因初始值选取不当陷入局部极值的缺陷,加速了运动模糊核的收敛,提高了运动模糊核估计精度。

本成像系统包含了 2 片 CMOS 传感器,它们分别工作在高空间分辨率、低帧率状态(以下称主传感器)和低空间分辨率、高帧率状态(以下简称次传感器)。主传感器由于积分时间较长,会产生运动模糊图像,影响图像应有的分辨率,而次传感

器积分时间非常短,可以忽略运动模糊对其影响,获取低分辨率高帧率的图像序列。由于主传感器和次传感器共享一个光学系统,具有相同的运动模糊路径,因此根据次传感器获得的图像序列可以估计主传感器获取图像的运动模糊核初始值,利用该初始值通过交替迭代的方法快速地优化模糊核,最后用 TV-L1 解卷积方法对主传感器得到的运动模糊图像进行复原。实验和仿真证明,该方法能有效去除图像的运动模糊,获取清晰的、高分辨率的图像。

2 多传感器成像系统

文献[10]提出了三种混合成像系统的概念,第一种设计方法是将 2 个相机并排放置,该方法设计简单,当拍摄远距离场景时可认为是同一视场角,但因两者镜头不同需要做高精度的几何校正。第二种方法是 2 个传感器通过分光镜共享 1 个镜头,避免了几何畸变对运动模糊图像复原的影响。第三种设计方法是利用特殊的图像传感器,该传感器同时包含了高分辨率的中心区域和低分辨率的边缘区域,由于第三种方法受图像传感器制约比较大,本文采用第二种设计方法,具体结构如图 1 所示。拍摄的场景通过相机的分光镜将一部分光照透射到主传感器上,而另一部分光照反射到次传感器上,在主传感器积分时间内,次传感器拍摄一系列图像,从而输出主传感器得到

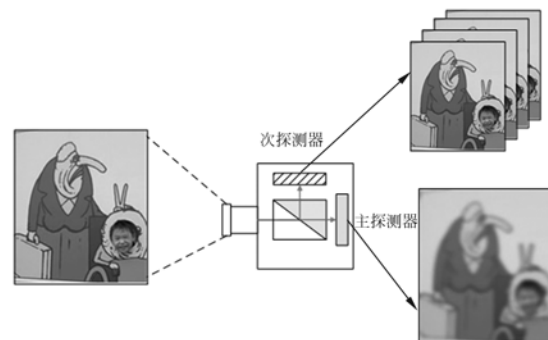


图 1 双 CMOS 成像系统内部结构

Fig. 1 Internal structure of dual CMOS imaging system

的一幅高分辨率图像和次传感器得到的多幅低分辨率图像序列。由于主、次传感器共享 1 个镜头,它们可以得到相同场景、不同分辨率的图像数据。

图 2 是本文研制的基于第二种架构的双 CMOS 成像系统,该系统包括双 CMOS 焦面板、驱动板、分光镜以及镜头,其中分光镜安装在该系统的镜头中,使 2 片 CMOS 能获取相同场景的图像数据。双 CMOS 焦面板通过柔线与驱动板连接,驱动板以现场可编程门阵列(FPGA)芯片为主控芯片,接收 PC 机通过 RS422 串口传送过来的积分时间及同步时钟等控制命令,控制两片 CMOS 相应的寄存器,使其工作在所需状态。

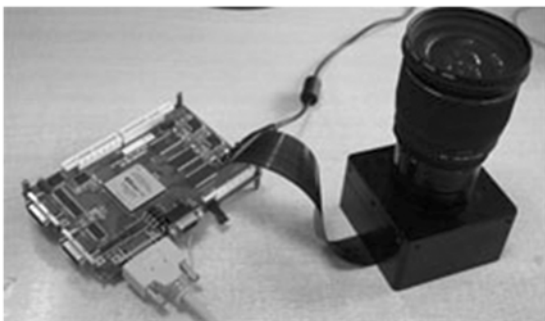


图 2 双 CMOS 成像系统

Fig. 2 Dual CMOS imaging system

3 估计运动模糊核

次传感器提供了曝光时间内固定间隔的图像序列,计算这些图像序列之间的全局刚性变化运动,就可以获得在曝光时间内任意复杂运动路径的采样,利用这些运动路径采样估计运动模糊核。下面首先介绍基于 Lucas-Kanade 光流法^[11]的运动路径计算方法,然后阐述运动路径推导模糊核的两个约束条件,根据这两个约束推导出估计运动模糊核的方法,最后给出了一种通过交替迭代优化进一步提高模糊核精度的方法。

3.1 计算运动路径

假设连续帧之间的运动是全局的刚性运动,那么可以用次传感器提供的连续帧计算这些帧之间的运动路径样本。运动路径的估计采用多分辨率迭代算法最小化公式(1)的光流误差函数:

$$\operatorname{argmin} \sum \left[u \frac{\partial I}{\partial x} + v \frac{\partial I}{\partial y} + \frac{\partial I}{\partial t} \right]^2, \quad (1)$$

其中 $\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y}, \frac{\partial I}{\partial t}$ 分别是图像的空间和时间上的偏

微分, (u, v) 是在 t 时刻的瞬时运动。两帧间的运动通过下列全局刚性运动模型来定义:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \Delta x \\ -\sin \theta & \cos \theta & \Delta y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 $(\Delta x, \Delta y)$ 表示平移量, θ 表示相对于光轴的旋转角度。

由光流法计算得到的运动向量是连续帧之间的离散运动采样,而运动路径应是连续的、关于运动速度和加速度的函数,即运动路径函数至少是连续且二次可微的。为满足该约束条件,本文采用三次样条插值方法将其插值成连续的运动路径,因为样条曲线满足光滑性和二次可微性。

3.2 模糊核初值估计

要将运动路径函数转换成连续的运动模糊核,要先定义运动模糊核必须满足的约束条件,然后用这些约束条件来估计运动模糊核。

任何运动模糊核都是能量分布函数 $k(x, y) \rightarrow e$, 其中 (x, y) 表示一个位置, e 表示该位置的能量值,因此模糊核矩阵的每个值不能为负值。假设在积分时间内,场景中的光照不会发生变化,那么所有模糊核应满足能量守恒定理,即模糊核 k 满足公式(3)这个约束条件:

$$\iint k(x, y) dx dy = 1. \quad (3)$$

它描述了在模糊操作过程中能量既不会丢失也不会增加, k 是归一化的卷积核。

现在考虑所有可能的运动模糊核子集,这些子集可以看作是平面内的曲线,曲线上的点在模糊核矩阵对应位置为非零值,不属于曲线上的点则为零值。用关于时间参数 t 的路径函数 $f(t) \rightarrow (x, y)$ 和能量函数 $e(t) \rightarrow e$ 来描述模糊核。假设场景的辐射值在积分时间内不会发生变化,于是定义另一个约束条件:

$$\int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} k(t) dt = \frac{\Delta t}{t_{\text{end}} - t_{\text{start}}}; \Delta t > 0, t_{\text{start}} \leq t \leq t_{\text{end}} - \Delta t. \quad (4)$$

$[t_{\text{start}}, t_{\text{end}}]$ 是图像积分起止时间,这个约束条件表明任何积分时间内的能量和积分时间成正比。给定这些限制条件我们就可以从离散的运动采样得到连续的运动模糊核。

3.3 模糊核优化

由于运动采样的离散性、光流法估计误差、分

分辨率不同导致的插值误差等原因,将次传感器图像序列估计得到的模糊核作为主传感器模糊图像的模糊核不够精确,需要对其进行优化,本文采用交替迭代方法来进一步优化主传感器模糊图像的模糊核。

假设 \mathbf{I} 表示 $n \times n$ 大小的原始图像, $\mathbf{I} \in \mathbf{R}^{n^2}$, \mathbf{k} 是运动模糊核, \mathbf{K} 是 \mathbf{k} 的矩阵形式, $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{n^2 \times n^2}$. η 是加性噪声, \mathbf{H} 是 η 的矩阵形式, $\mathbf{H} \in \mathbf{R}^{n^2}$. \mathbf{B} 是观察图像, $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n^2}$, 它们满足以下公式:

$$\mathbf{B} = \mathbf{k} \otimes \mathbf{I} + \eta = \mathbf{K}\mathbf{I} + \mathbf{H}. \quad (5)$$

给定 \mathbf{K} , 从观察图像 \mathbf{B} 复原清晰图像 \mathbf{I}' , 然后根据复原结果 \mathbf{I}' , 从观察图像 \mathbf{B} 复原估计模糊核 \mathbf{K}' , 这种交替迭代过程, 最终不断优化估计的运动模糊核 \mathbf{K}' , 中间估计的清晰图像 \mathbf{I}' 将不会影响最后去模糊的结果。

为了快速地迭代优化 \mathbf{K} 和 \mathbf{I} , 本文假定图像 \mathbf{I} 和模糊核 \mathbf{K} 的梯度满足高斯先验, 采用贝叶斯准则来估计 \mathbf{K}' 和 \mathbf{I}' , 通过最小化下列公式(6)和公式(7)来实现:

$$\mathbf{I}' = \operatorname{argmin}_{\mathbf{I}} \{ \|\mathbf{B} - \mathbf{K}\mathbf{I}\|^2 + \lambda_1 \|\nabla \mathbf{I}\|^2 \}, \quad (6)$$

$$\mathbf{K}' = \operatorname{argmin}_{\mathbf{K}} \{ \|\mathbf{B} - \mathbf{K}\mathbf{I}\|^2 + \lambda_2 \|\mathbf{K}\|^2 \}. \quad (7)$$

该最小化问题是凸性的, 可以用封闭解方法快速得到收敛的模糊核解, 本文采用了共轭梯度法(Conjugate Gradient, CG)来实现。

4 图像复原的实现

4.1 图像复原流程

双 CMOS 成像系统中运动模糊图像的整个复原流程如图 3 所示。首先是估计运动模糊核的初始值, 该过程利用高帧率低分辨率图像序列来获得, 通过 Lucas-Kanade 光流法获取离散的运动

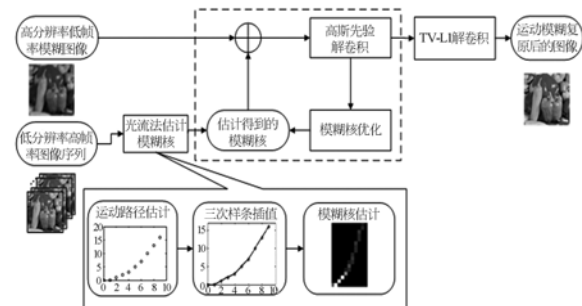


图 3 运动模糊图像复原流程

Fig. 3 Restoration process of motion blurred image

采样, 用三次样条插值来估计路径 $f(t)$, 根据公式(3)的能量守恒和公式(4)的能量与积分时间成正比这两个约束条件估计能量函数 $k(t)$, 通过对 $k(t)$ 归一化得到低帧率高分辨率模糊图像的运动模糊核初始估计值。接着, 通过贝叶斯准则交替迭代优化模糊核。最后, 根据优化后的运动模糊核采用 TV-L1 解卷积方法实现对低帧率高空间分辨率模糊图像的复原。

4.2 TV-L1 解卷积

已知运动模糊图像的模糊核, 可以用经典的解卷积方法复原模糊图像, 如逆滤波、Lucy-Richardson 方法^[9]等, 但是这些方法得到的结果往往不是很理想, 会出现令人讨厌的振铃现象。最新的解卷积方法有基于自然图像稀疏先验统计的方法^[2]、基于贝叶斯的方法^[6]、全变分(Total Variation, TV)复原方法^[12-13]等。其中全变分复原方法具有复原效果好、抗噪声能力强、运算速度快等特点, 为此本文选用快速全变分复原方法^[12-13]进行解卷积。该方法是经典增强性拉格朗日算法的一种变形, 其基本思路是将 TV 问题用线性等价约束形式来表示, 从而实现目标函数的分离, 然后用 Gauss-Seidel 方法来更新主要变量和其他 2 个变量, 从而实现增强型拉格朗日函数最小化。下面简单的介绍一下该算法的实现流程。

根据公式(5)的图像运动模糊模型得到基于 L^1 范数的正则化公式:

$$\min_{\mathbf{I}} \sum_{i=1}^{n^2} \|\mathbf{D}_i \mathbf{I}\|_2 + \mu \|\mathbf{K}\mathbf{I} - \mathbf{B}\|_1, \quad (8)$$

其中 $\mathbf{D}_i \mathbf{I} \in \mathbf{R}^2$ 表示 \mathbf{I} 在像素 i 处的水平和垂直方向的一阶差分。公式(8)可以写作以下等效方式:

$$\min_{x, y, z} \{ \sum_i \|w_i\| + \mu \|v\|_1 : i = 1, \dots, n^2 \}, \quad (9)$$

其中 $w_i = \mathbf{D}_i \mathbf{I}$, $v = \mathbf{K}\mathbf{I} - \mathbf{B}$, 上述公式(9)的拉格朗日函数为:

$$l_a(\mathbf{I}, \mathbf{w}, \mathbf{v}, \lambda) = \sum_i \|w_i\| - \lambda_1^T (\mathbf{w} - \mathbf{D}\mathbf{I}) + \frac{\beta_1}{2} \sum_i \|w_i - \mathbf{D}_i \mathbf{I}\|^2 + \mu \|\mathbf{v}\|_1 - \lambda_2^T [\mathbf{v} - (\mathbf{K}\mathbf{I} - \mathbf{B})]^2 + \frac{\beta_2}{2} \|\mathbf{v} - (\mathbf{K}\mathbf{I} - \mathbf{B})\|^2, \quad (10)$$

其中 $\beta_1, \beta_2 > 0$, $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2) \in \mathbf{R}^{3n^2}$ 是拉格朗日因子。于是, 给定 $(\mathbf{I}^k, \lambda^k)$, 求下一次迭代的值 $(\mathbf{I}^{k+1}, \mathbf{w}^{k+1}, \mathbf{v}^{k+1}, \lambda^{k+1})$ 的步骤如下:

(1) 给定 $\mathbf{I}=\mathbf{I}^k$ 和 $\boldsymbol{\lambda}=\boldsymbol{\lambda}^k$,用公式(11)和公式(12)对 \mathbf{w} 和 \mathbf{v} 最小化 l_a 得到 \mathbf{w}^{k+1} 和 \mathbf{v}^{k+1} :

$$\mathbf{w}^{k+1}=\max\left\{\left\|\mathbf{D}_1\mathbf{I}^k+\frac{(\boldsymbol{\lambda}_1)_i^k}{\beta_1}\right\|-\frac{1}{\beta_1},0\right\}\frac{\mathbf{D}_1\mathbf{I}^k+(\boldsymbol{\lambda}_1)_i^k/\beta_1}{\left\|\mathbf{D}_1\mathbf{I}^k+(\boldsymbol{\lambda}_1)_i^k/\beta_1\right\|}, \quad (11)$$

$$\mathbf{v}^{k+1}=\text{sgn}(\mathbf{K}\mathbf{I}^k-\mathbf{B}+(\boldsymbol{\lambda}_2)^k/\beta_2)\cdot \max\left\{\left|\mathbf{K}\mathbf{I}^k-\mathbf{B}+(\boldsymbol{\lambda}_2)^k/\beta_2\right|-\mu/\beta_2,0\right\}, \quad (12)$$

(2) 用公式(13)解 \mathbf{I}^{k+1} :

$$\left(\mathbf{D}^T\mathbf{D}+\frac{\beta_2}{\beta_1}\mathbf{K}^T\mathbf{K}\right)\mathbf{I}=\mathbf{D}^T\left(\mathbf{w}^{k+1}-\frac{(\boldsymbol{\lambda}_1)^k}{\beta_1}\right)+\mathbf{K}^T\left(\frac{\beta_2\mathbf{v}^{k+1}-(\boldsymbol{\lambda}_2)^k}{\beta_1}\right)+\frac{\beta_2}{\beta_1}\mathbf{K}^T\mathbf{B}, \quad (13)$$

(3) 用公式(14)和公式(15)来更新 $\boldsymbol{\lambda}$:

$$(\boldsymbol{\lambda}_1)^{k+1}=(\boldsymbol{\lambda}_1)^k-\gamma\beta_1(\mathbf{w}^{k+1}-\mathbf{D}\mathbf{I}^{k+1}), \quad (14)$$

$$(\boldsymbol{\lambda}_2)^{k+1}=(\boldsymbol{\lambda}_2)^k-\gamma\beta_2[\mathbf{v}^{k+1}-(\mathbf{K}\mathbf{I}^{k+1}-\mathbf{B})], \quad (15)$$

反复执行上述 3 个步骤最终获得复原后的图像。该方法通过交替迭代减少了计算量,提高了计算速度,同时该方法对带椒盐噪声的图像能获得很好的复原结果,这将在后面的实验结果中得到体现。

5 实验与仿真结果

本文的实验分为 2 个步骤,首先来验证运动模糊核估计的性能,然后通过双 CMOS 成像系统实际拍摄的图像来测试本文提出的算法。

5.1 模糊核精确性测试

对模糊核精确性的测试用误差率^[14]参数来衡量。假设清晰图像为 \mathbf{I}_{gt} ,真实模糊核为 \mathbf{k}_{gt} ,用 \mathbf{k}_{gt} 去模糊得到的图像为 $\mathbf{I}_{\text{k}_{\text{gt}}}$,不同算法去模糊得到的图像为 \mathbf{I}_{out} ,那么误差率公式如下:

$$\text{Err}=\frac{\left\|\mathbf{I}_{\text{out}}-\mathbf{I}_{\text{gt}}\right\|^2}{\left\|\mathbf{I}_{\text{k}_{\text{gt}}}-\mathbf{I}_{\text{gt}}\right\|^2}. \quad (16)$$

如公式(16)所示, \mathbf{I}_{gt} 和 \mathbf{k}_{gt} 已知,当 $\mathbf{I}_{\text{k}_{\text{gt}}}$ 和 \mathbf{I}_{out} 采用相同的去模糊方法,所估计的模糊核和 \mathbf{k}_{gt} 完全一致时误差率 Err 为 1,也就是说误差率越接近 1 说明估计的模糊核越精确。

本文选择 6 幅清晰的自然图像,每幅图像大小为 512×512 ,如图 4 所示。将这 6 幅图像与 3 个不同的模糊核卷积产生 18 幅不同的模糊图像,另外,为测试噪声对模糊核估计的影响,分别给这些模糊图像加上噪声密度为 1% 的椒盐噪声,这样生成无噪声模糊图和含噪声模糊图一共 36 幅测试图像。模糊核大小、运动路径以及提取运动

路径的图像序列帧数如表 1 所示。



图 4 仿真图像

Fig. 4 Simulation images

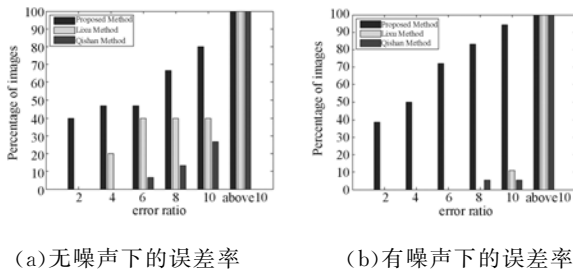
表 1 模糊核、运动路径相关参数

Tab. 1 Parameters of blur kernel, motion path

模糊核			
模糊核尺寸	10×19	10×11	11×11
运动路径	(t, 2t)	(5×sin t, 5×cos t)	(5×sin t, t)
低空间分辨率图像帧数	10	10	10

利用这些模糊图像、真实模糊核、运动路径图像序列分别用本文提出的方法、Lixu 的方法^[8]以及 Qishan^[7]的方法来估计模糊核,并都采用文献[12-13]提出的解卷积方法进行复原。3 种方法的复原结果用公式(16)计算误差率,得到图(5)的误差率累积直方图,水平方向表示误差率值,垂直方向表示小于该误差率值的复原图像占复原图像总数的比例,同一误差率下复原图像占图像总数的比例越高说明复原效果越好。图 5(a)描述了无噪声模糊图像复原结果,从图中可以发现本文提出的方法误差率小于 2 的复原图像数量占 38% 以上,而其他 2 种方法误差率都大于 2。在相同的误差率下,本文提出的方法占总图像的比值最大,其次是 Lixu 提出的方法,最后是 Qishan 的方法。图 5(b)描述了加 1% 椒盐噪声的模糊图像复原结果,对比图 5(a)不难发现,本文提出的模糊核估计方法受噪声影响较小,仍有 38% 以上的复原图像误差率小于 2,而其他两种方法受噪声影响误差率明显升高。由于利用多帧图像估计模糊核初始值,虽然噪声会对光流法估计运动路

径的精度有一定影响,但是对空间移不变运动模糊核,本文的方法对整幅图像的运动向量求平均值,这在一定程度上抑制了随机噪声对模糊核估计的影响。而 Lixu 和 Qishan 的方法采用单张模糊图像估计模糊核,噪声的干扰影响了模糊核的估计,造成复原后的图像误差率大大提高。纵观 3 种方法在含噪和不含噪条件下获取模糊核的能力,可以发现本文提出的方法获取的模糊核精确性最高,Lixu 的方法为其次,最后是 Qishan 的方法。



(a) 无噪声下的误差率 (b) 有噪声下的误差率
(a) Error rate without noise (b) Error rate with noise

图 5 误差率累计直方图

Fig. 5 Cumulative histogram of error rate

5.2 图像复原效果测试

前面已经对模糊核估计方法进行了定量分析,下面直观地对比一下图像复原效果。

图 6(a)和图 6(b)分别是仿真用的清晰图像和不含噪声的模糊图像,图 6(c)、(d)、(e)、(f)分别是真实模糊核及复原的图像、Lixu 方法复原的图像及模糊核、Qishan 方法的复原图像及模糊核、本文提出的方法复原图像及模糊核,对比这些图像可以发现,本文提出的方法得到的模糊核最接近真实模糊核,复原结果最理想。而 Lixu 和 Qishan 的方法由于估计的模糊核和真实模糊核有些偏差,因此复原的图像或多或少出现振铃。



(a) 清晰图像 (b) 模糊图像
(a) Ground truth image (b) Blurred image



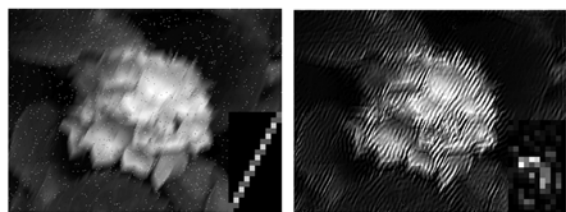
(c) 真实模糊核和复原图像 (d) Lixu 的方法
(c) Ground truth blur kernel and resoration image (d) Lixu's method



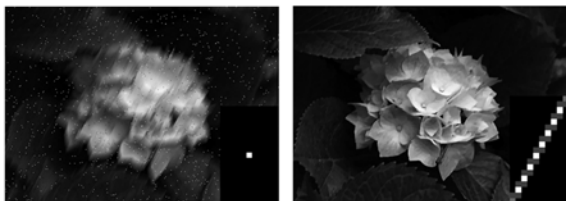
(e) Qishan 的方法 (f) 本文的方法
(e) Qishan's method (f) Proposed method

图 6 不含噪声的模糊图像复原结果

Fig. 6 Restoration results of blurred image without noise



(a) 加噪的模糊图像及真实模糊核 (b) Lixu 的方法
(a) Blurred image with noise (b) Lixu's method and ground truth blur kernel



(c) Qishan 的方法 (d) 本文的方法
(c) Qishan's method (d) Proposed method

图 7 含噪声的模糊图像复原结果

Fig. 7 Restoration result of blurred image with noise

再看含噪模糊图像的复原情况,如图 7(a)所示,该模糊图像被 1% 的椒盐噪声污染。3 种算法

的复原结果如图 7(b)、(c)、(d)所示,本文提出的方法在噪声污染的情况下仍能很好地估计模糊核并复原图像,而 Lixu 和 Qishan 的方法受噪声影响使模糊核估计完全偏离了真实值,复原结果可想而知非常不理想。由此得出结论,本文提出的估计模糊核的方法抗噪声干扰能力强。



(a) 模糊图像、清晰图像及图像序列

(a) Blurred image, ground truth and image sequence



(b) Lixu 的方法

(b) Lixu's method



(c) Qishan 的方法

(c) Qishan's method



(d) 本文的方法

(d) Proposed method

图 8 实际拍摄图像复原结果

Fig. 8 Restoration results of actual shooting image

最后用双 CMOS 成像系统进行了实物拍摄,通过 RS422 串口将一片 CMOS 积分时间设为 100 ms,分辨率为 $2\ 352 \times 1\ 728$,而另一片 CMOS 积分时间设为 5 ms,分辨率为 320×240 ,因此在 100 ms 积分时间内可以获得 20 帧低分辨率图像,如图 8(a)所示,由于积分时间内相机抖动引起拍摄的汽车图像比较模糊。这幅图像同样采用 3 种算法进行复原对比,如图 8(b)、(c)、(d)所示,可以发现这 3 种方法复原结果都一定程度上改善了模糊图像的质量,使图像更加清晰。但是相比之下,本文提出的方法振铃现象相对 Lixu 和 Qishan 的方法少很多,图像质量相比较较好。由此可见,本文提出的方法对空间移不变的模糊图像能获得较好的去模糊效果。

6 结 论

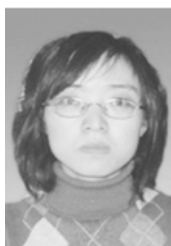
本文通过设计双 CMOS 成像系统,利用次传感器获取的图像序列间的变化估计运动路径,由此获取模糊核的初始估计,通过贝叶斯交替迭代方法快速的优化模糊核,利用 TV-L1 方法恢复出清晰图像。通过仿真图像的定性和定量分析,该方法能有效去除空间移不变的运动模糊,受噪声影响小,去模糊后图像的振铃小。该方法对实际拍摄的模糊图像的复原效果也很显著。虽然目前本文提出的方法只针对空间移不变的运动模糊图像进行去模糊处理,但是实际上利用光流法计算运动路径本身是局部问题,可以用该局部运动向量计算空间变化的运动模糊核,也就是说,本文提出的方法理论上可以应用到空间变化的运动模糊图像中,今后,应该在此方向继续探索和研究。

另外,双 CMOS 在一定程度上增加了成像系统的成本,目前航天、航空相机,甚至高端民用相机本身都配备了运动向量测试装置,如惯性传感器等,只要获取当前帧积分时间内的运动向量,采用本文提出的方法同样能实现运动模糊图像的复原。因此本文提出的方法可以和相机已有的运动去模糊方法配合使用,进一步提高去模糊图像的质量。

参考文献:

- [1] JIA J. Single image motion deblurring using transparency[C]. *CVPR'07, Minneapolis, MN, United States*, 2007:1-8.
- [2] LEVIN A. Blind motion deblurring using image statistics [J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2007:841-848.
- [3] RASKAR R, AGRAWAL A, TUMBLIN J. Coded exposure photography: Motion deblurring using fluttered shutter [J]. *SIGGRAPH*, 2006, 25(3): 795-804.
- [4] 李仕, 张葆, 孙辉. 航空成像像移补偿的并行计算 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1):225-230.
LI SH, ZHANG B, SUN H. Parallel restoration for motion blurred aerial image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):225-230. (in Chinese)
- [5] 贾平, 张葆, 孙辉. 航空成像像移模糊恢复技术 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4):697-703.
JIA P, ZHANG B, SUN H. Restoration of motion-blurred aerial image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):697-703. (in Chinese)
- [6] FERGUS R, SINGH B, HERTZMANN A, et al.. Removing camera shake from a single photograph [J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 787-794.
- [7] SHAN Q, JIA J, AGARWALA A. High-quality motion deblurring from a single image [J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2008, 27(3):7301-7310.
- [8] XU L, JIA J. Two-phase kernel estimation for robust motion deblurring [J]. *ECCV*, 2010:157-170.
- [9] RICHARDSON W. Bayesian-based iterative method of image restoration [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1972, 62(1):55-59.
- [10] BEN-EZRA M, NAYAR S K. Motion-based motion deblurring [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(6): 689-698.
- [11] LUCAS B D, KANADE T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision [J]. *DARPA81*, 1981:121-130.
- [12] WANG Y, YANG J, YIN W, et al.. A new alternating minimization algorithm for total variation image reconstruction [J]. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2008, 1(3):1-24.
- [13] YANG J, ZHANG Y, YIN W. An efficient TVL1 algorithm for deblurring multichannel images corrupted by impulsive noise [J]. *SIAM J. Sci. Comput.*, 2009, 31(4):2842-2865.
- [14] LEVIN A, WEISS Y, DURAND F, et al.. Understanding and evaluating blind deconvolution algorithms [C]. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009:1964-1971.

作者简介:



范赐恩(1975—),女,浙江慈溪人,博士研究生,讲师,2001年于武汉大学获得硕士学位,主要从事图像处理、机器视觉等方面的研究。E-mail: fce@whu.edu.cn



张立国(1961—),男,吉林长春人,研究员,研究生导师,2003年于长春理工大学获硕士学位,主要从事空间光学遥感器研究。E-mail: zlgxx9@163.com



张 虎(1986—),男,天津人,博士研究生,2009年于武汉大学获得学士学位,主要从事图像处理、机器视觉等方面的研究。E-mail: zhanghu0722@126.com

通信作者:



陈 曦(1980—),男,湖北宜昌人,博士,副教授,2007年于武汉大学获得博士学位,主要从事人工智能、信号处理、现代电路设计等方面的研究。E-mail: robertcx@whu.edu.cn

导师简介:



邓德祥(1961—),男,湖北荆州人,教授,博士生导师,1988年于武汉测绘科技大学获得硕士学位,主要从事空间图像处理,片上系统的研究。E-mail: ddx@whu.edu.cn

●下期预告

不完整球形超导转子静平衡的气浮测量方法

高 霏^{1,2},王 晖¹,胡新宁¹,王秋良¹

(1. 中国科学院 电工研究所 应用超导重点实验室,北京 100190

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

为了克服现有技术对于空心薄壁不完整球形超导转子平衡测定精度较低的缺点,介绍了一种控制转子不平衡量方位的气浮平衡测定方法。采用在转子内部增加重量的方法来改变转子的不平衡量大小,使得该转子的不平衡量的方位角处于精确测量范围内。当增重量变化时其测量值也会发生相应的变化,通过静不平衡计算的相关公式即可得出其静不平衡量。该方法能够提高这种超导球形转子平衡测定的精度,不破坏转子的加工精度,不影响转子的电磁特性、超导特性等。测量转子偏心距大小的波动在 $\pm 6 \mu\text{m}$ 之内,偏心距 Z 轴分量的波动在 $\pm 8 \mu\text{m}$ 之内。该方法可有效提高超导重力计等基于该类型超导转子的仪器的工作性能和测量精度,对于其它无机械支撑轴转子的平衡测定也有一定借鉴意义。测量过程中采用的设备简单,实验周期短,测量结果精度较高。