

基于混合编码曝光的匀加速运动模糊图像复原方法^{*}

徐树奎, 张 军, 涂 丹, 李国辉

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对运动模糊图像复原问题中点扩展函数难以准确获得和图像反卷积的病态性,提出了一种基于混合编码曝光相机的运动模糊复原框架。混合编码曝光相机由一个高速双目立体相机和一个高分辨率编码曝光相机构成。编码曝光相机在其曝光过程中由一个二进制编码控制其快门的开关状态。双目立体摄像机作为一个运动传感器在编码相机曝光的开始、中间和结束时刻分别拍摄三对立体图像对。提出了一种基于二进制编码和运动参数的PSF评估算法和一种基于双目立体视觉的运动测量算法来获得运动参数。在获得编码曝光运动模糊图像的PSF后,使用直接反卷积方法进行图像复原获得清晰图像。实验结果表明,该方法能够自动快速有效地对运动模糊图像进行复原。

关键词:运动模糊复原;混合相机;编码曝光;运动测量

中图分类号:TP391 文献标识码:A

A Constant Acceleration Motion Blur Image Deblurring Based on Hybrid Coded Exposure

XU Shu-kui, ZHANG Jun, TU Dan, LI Guo-hui

(College of Information System and Management, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Accurate PSF (Point Spread Function) estimation and image deconvolution are two key point problems during motion blur image deblurring. Aimed at these key problems, a motion deblurring framework based on hybrid coded exposure camera was proposed. The hybrid coded exposure camera is made up of a high-speed stereo camera and a high-resolution coded exposure camera. The coded exposure camera is the main camera which uses a kind of binary code to control the shutter during the exposure time. As a secondary motion sensor, the stereo camera can capture three image pairs in the beginning, middle and the end time of the coded exposure camera's exposure time. An algorithm based on the binary code and the motion parameters was proposed to estimate the accurate PSFs of the coded exposure images. The motion parameters are obtained by a motion measurement algorithm based on the stereo vision. Direct deconvolution algorithm was used for deblurring the blur images. The experiment results show that the technique aforementioned can deblur constant acceleration motion blur images effectually and quickly.

Key words: motion deblurring; hybrid camera; coded exposure; motion measurement

图像运动模糊是由于相机在曝光过程中与被摄场景存在相对运动造成的。图像运动模糊复原问题是图像处理以及计算机视觉领域中的一个基础性问题也是一个公认的难题^[1]。精确的点扩展函数(PSF)估计和图像反卷积的病态性问题是运动模糊图像复原的两大难点。传统的图像运动模糊复原方法由于以上两方面的原因,在求解清晰图像的过程中会产生振铃效应、分辨率降低等问题,恢复结果不够理想。

近几年,一些采用计算摄影技术进行运动模糊图像恢复的方法^[2-6]被提出并取得较理想的复

原效果。采用计算摄影技术的复原方法与以往仅仅通过单幅运动模糊图像复原方法不同,新的复原方法通常会引入一些辅助传感器或改变传统图像的获取方式来改进传统复原方法的不足。计算摄影技术的发展,将几乎被认为没有发展空间的图像复原领域重新推上了研究的热点。计算摄影技术将图像复原扩展到多个学科多个领域的综合处理,而不是仅仅局限在图像处理领域。Ben-Ezra等^[2]首先提出一种使用视频传感器作为估计图像运动路径的辅助传感器的运动模糊复原方

* 收稿日期:2011-04-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60902093,61170159)

作者简介:徐树奎(1982—),男,博士生。

法。该方法利用视频运动分析技术得到运动模糊图像的运动路径,进而得到运动模糊图像的 PSF。与传统运动模糊图像盲复原方法相比,该方法能够更直接地计算出运动模糊图像的 PSF,因而具有更好的复原效果。虽然使用视频传感器能够计算出运动模糊图像的 PSF,该方法并没有改变运动模糊复原问题的病态性,需要使用 Richardson-Lucy (R-L)^[7] 这样的迭代恢复算法来获得较好的恢复效果并且算法的计算时间复杂度很高,很难达到实时处理。Joshi 等^[8] 引入运动传感器对相机曝光时间段的相机运动进行测量,通过相机运动建模获得运动模糊图像的 PSF。该方法适用于相机运动导致的运动模糊,不适用于场景中运动目标导致运动模糊的情况。针对传统相机拍摄的运动模糊图像在复原时的病态性问题,受天文摄影中采用“改进一致冗余阵列 (Modified Uniformly Redundant Arrays, MURA)”改进拍摄图像的信噪比的方法的启发,Raskar 等^[3] 提出了一种编码曝光的图像拍摄方法用来解决图像反卷积的可逆性问题。编码曝光 (Coded Exposure, CE) 方法是一种在相机曝光时间段内快速开-关快门的拍摄方法,它改变了运动模糊图像的形成过程,将反问题的病态性转化为良态,从而能够快速的应用反卷积方法获得清晰图像。CE 方法是假设在 PSF 尺寸已知的情况下,对运动模糊图像进行处理的、没有给出 PSF 估计的方案。本文结合两种方案的优势,提出了一种基于混合编码曝光 (Hybrid Coded Exposure, HCE) 相机的运动模糊复原方法。

1 运动模糊分析

数字图像在形成过程中,被摄场景与图像传感器之间存在相对运动,场景中的一个点不是仅仅反映到图像上的一个对应点,而是沿运动路径被弥散成图像平面上一条曲线。因此,图像上的每个点是景物的许多点经混合叠加的反映。上述过程可以写成卷积形式^[9]:

$$y(u, v) = h(u, v) * x(u, v) + n(u, v) \quad (1)$$

其中, $h(u, v)$ 为点扩展函数, $*$ 为卷积符号, $x(u, v)$ 为清晰图像, $n(u, v)$ 为噪声。

在频域中的形式为

$$Y(u, v) = X(u, v)H(u, v) + N(u, v) \quad (2)$$

式中 $X(u, v)$ 、 $Y(u, v)$ 、 $H(u, v)$ 和 $N(u, v)$ 分别是降质图像 $x(u, v)$ 、原始图像 $y(u, v)$ 、点扩散函数 $h(u, v)$ 和噪声 $n(u, v)$ 的傅立叶变换。

在 $h(u, v)$ 已知的前提下,根据:

$$\hat{X}(u, v) = \frac{Y(u, v)}{H(u, v)} + \frac{N(u, v)}{H(u, v)} \quad (3)$$

可得复原图像的傅立叶变换 $\hat{X}(u, v)$, 经傅立叶反变换后即可得到复原图像。传统曝光图像中,由于卷积核的频带有限或傅立叶域不完全覆盖的情况下导致信息丢失而造成反卷积是不可能的^[3]。例如:拍摄一张图像的曝光时间为 T , 等价于在时域内与一个盒状滤波 (box filter) 的卷积,盒状滤波器在频域内存在很多幅值零点,即 $H(u, v) = 0$, 如图 1 所示,因而不能采用式 3 进行直接运算。为了解决这个问题,一些算法采用最大似然估计方法来近似求解,例如著名的 R-L 算法就是用一个图像统计模型以及贝叶斯框架求得最优估计的图像恢复算法。然而,由于 R-L 算法的非线性迭代过程非常耗时,通常用于一些事后处理的场合,对于一些要求实时性较高的应用,则需要寻找更直接的算法来快速复原运动模糊图像。CE 方法将盒状滤波器转化为一个宽带滤波器,如图 1 所示,该滤波器频域内无零点,使得直接运算成为可能,但该方法并没有给出运动模糊的 PSF 尺度,难以自动处理。

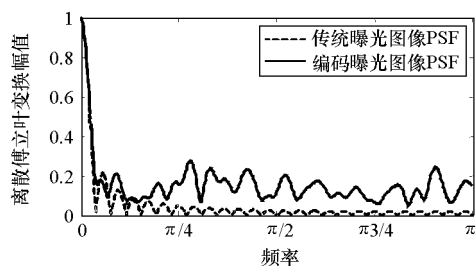


图 1 传统曝光过程与编码曝光过程的频域对比
Fig. 1 Frequency comparison of traditional exposure and coded exposure

2 混合编码曝光相机设计

针对文献[2]方法时间效率和 CE 方法缺少 PSF 自动估计等问题,提出了一个基于混合编码曝光相机 (HCE camera, HCEC) 的运动模糊复原技术框架,如图 2 所示。混合编码曝光相机由一个高速双目立体视频摄像机和一个高分辨率编码曝光相机构成。高速双目立体视觉摄像机用于在高分辨率相机曝光期间记录相机或场景的运动情况,利用亚像素精度的运动测量技术获得高分辨率相机在曝光期间的运动参数,进而估计出高分辨率相机拍摄运动模糊图像的 PSF。高分辨率编码曝光相机采用 CE 方法拍摄运动模糊图像,在获得 PSF 后使用基于最小二乘法的快速反卷积算法恢复出高分辨率的清晰图像。

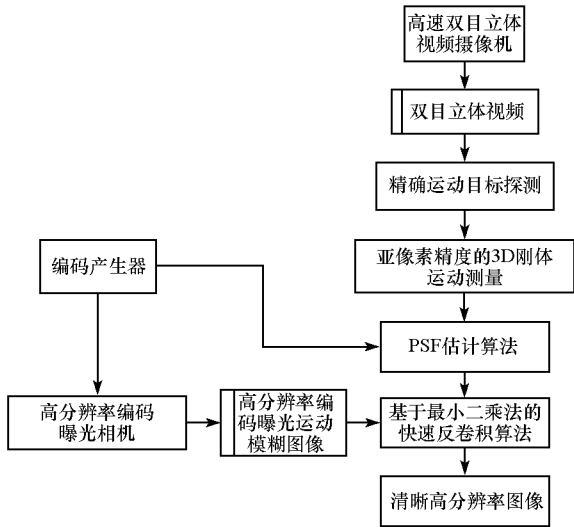


图2 基于混合相机编码曝光的运动模糊复原技术框架

Fig. 2 Processing pipeline using our hybrid coded exposure camera for motion deblurring

CE 方法的实现方式主要有两种：一种是采用铁电体(ferro-electric)快门；一种是采用支持分次曝光脉冲宽度模式 (IEEE DCAM Trigger mode 5)^[5] 的 CCD 电子快门。电子快门相较铁电体快门具有不需要额外的成本以及编程实现简单等优势。本文采用 PointGrey^[11] 公司的 Flea2 系列相机作为编码曝光相机 (CEC)，该相机电子快门支持分次曝光脉冲宽度模式，可以编程实现 CE 功能；采用 Bumblebee2 双目立体相机作为运动测量相机。两款相机之间采用两个 L 型相机托架固定，形成一个上下放置的混合相机如图 3 (a) 所示。本文采用了 Arduino Duemilanove 系列微控制器^[12] 为 Flea2 相机和 Bumblebee2 相机提供外部触发信号完成如图 4 所示的混合编码曝光过程。混合相机之间的外部参数采用 Matlab 相机标定工具箱^[13] 标定。



图3 混合编码曝光相机与实验环境设置

Fig. 3 Hybrid coded exposure camera and experiment setup

3 编码曝光模糊图像的 PSF 估计

与传统相机曝光过程中快门一直处于开启状态不同，编码曝光相机是在曝光过程中采用一个

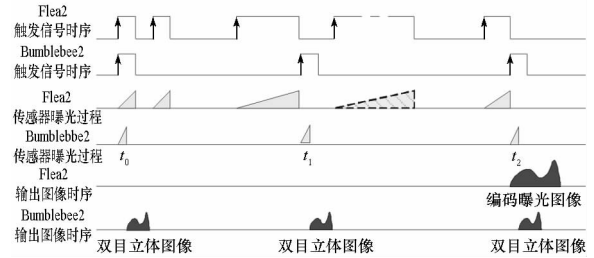


图4 混合编码曝光相机触发时序模式

Fig. 4 Trigger mode of hybrid coded exposure camera

优化带宽的二进制码来控制相机快门的开-关状态。文献[3]通过穷举搜索方法得到了一个长度 m 为 52 的近似最优编码序列：“101000011100000 1010000110011110111010111001001100111”。通过这样的一个编码曝光过程，将传统图像拍摄过程的盒状滤波器转化为一个带宽更宽的宽带滤波器，从而保留拍摄图像的更多频域信息。若每个编码时间内场景运动一个像素距离，则该序列归一化后即构成导致图像运动模糊的 PSF。

然而，在编码曝光过程中，场景运动距离是不确定的，因此，编码构成的 PSF 与真实 PSF 之间还存在一个尺度之间的差异。理想情况是可以根据场景的运动尺度选择相应长度的最优编码，使用最优编码进行编码曝光获得与编码长度一致的运动模糊图像，但是场景的运动速度往往难以预先确定，因此只能采取其他措施来解决编码长度与实际运动距离之间的差异问题。文献[3]假设物体为匀速直线运动，在估计了场景的运动距离 k 之后，使用双立方插值方法将运动模糊图像缩放至运动距离与编码长度一致的尺寸，然后使用反卷积方法处理，处理之后再图像缩放至原始尺寸。这种做法有两次图像的缩放变换，在缩放尺度较大时，会有较大的分辨率损失。与文献[3]方法不同，本文假设物体匀加速运动，设计了一种算法直接计算出编码曝光图像的 PSF。

假设场景与相机之间运动为加速度恒定的直线运动。设场景中一点 P 在编码曝光相机开始曝光时刻 t_0 、中间时刻 t_1 和结束曝光时刻 t_2 所处的图像坐标分别为 x_0, x_1, x_2 ，点 P 在 t_0 处初速度为 v_0 ，如图 5 所示。

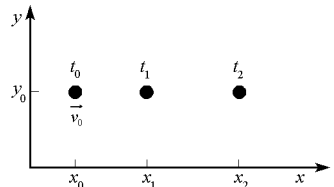


图5 匀加速直线运动

Fig. 5 The motion with a constant acceleration

由匀加速运动公式可得

$$(x_1 - x_0) = v_0(t_1 - t_0) + \frac{1}{2}a(t_1 - t_0)^2 \quad (4)$$

$$(x_2 - x_0) = v_0(t_2 - t_0) + \frac{1}{2}a(t_2 - t_0)^2 \quad (5)$$

令 $\Delta t = t_1 - t_0 = t_2 - t_1$, 由式(4)和式(5)可得

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta t & \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ 2\Delta t & 2\Delta t^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 - x_0 \\ x_2 - x_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

考虑只有 x 方向存在匀加速直线运动情况, 匀加速直线运动情况下模糊图像的积分公式可写成

$$g(x_0, y_0) = \frac{1}{t_2 - t_0} \int_{t_0}^{t_2} f[x_0 - x(t), y_0] dt \quad (7)$$

其中, (x_0, y_0) 为 P 点在 t_0 时刻的坐标, $x(t)$ 为 P 点在 t 时刻的运动距离, $f(x, y)$ 为清晰场景, $g(x, y)$ 为模糊图像。由每个像素尺寸一致, 可以将上式离散化为

$$g(x_0, y_0) = \frac{1}{t_2 - t_0} \sum_{i=1}^n f(x_0 - i) \times \Delta t_i \quad (8)$$

其中, n 为点 P 从 t_0 时刻到 t_2 时刻移动的像素点个数, Δt_i 为第 i 个像素点经过 (x_0, y_0) 所需要的时间。由匀加速直线运动公式, 可解得 P 点在第 i 个像素的开始时间和结束时间, 两时间相减可得 Δt_i 。 P 点经过 n 个像素点时间 Δt_i 记为时间向量 ΔT :

$$\Delta T = (\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n) \quad (9)$$

公式可转换为卷积形式:

$$g(x, y) = \frac{\Delta T}{t_2 - t_0} * f(x, y) \quad (10)$$

匀加速直线运动的 PSF 即为

$$h(x, y) = \frac{\Delta T}{t_2 - t_0} \quad (11)$$

对于编码曝光模糊图像的 PSF, 可以求解每段曝光的时间向量 ΔT_j , 再将快门关闭时间段添加 0 向量, 即得 PSF:

$$h(x, y) = \frac{1}{\sum \Delta t_i} (\Delta T_1, 0, \Delta T_2, \dots, \Delta T_m) \quad (12)$$

其中 0 为相机快门关闭时间段内场景点运动过的像素点个数 0 组成的零向量, m 为编码为 1 的曝光段数目, 对于文献[3]所给出的编码, $m = 13$ 。

4 基于立体视觉的运动测量方法

编码曝光相机在拍摄过程中, 相机的运动或物体的运动参数是未知的, 本文通过视频运动测量方法获得运动距离参数 x_0, x_1, x_2 。与相机内部的运动传感器不同, 本文采用的视频摄像机不仅

可以获得场景的运动, 也可以获得场景中运动物体的运动, 因此具有更广的应用范围。本节内容分为运动目标的精确探测和运动目标的运动测量两部分。

4.1 基于“减背景”方法和 SUSAN 边缘提取的精确目标探测方法

在视频目标探测应用中, “减背景”方法是运动目标探测的常用方法, 具有算法简单、时间效率高优势。“减背景”方法在背景噪声水平较高、背景估计不准确的条件下, 通常会造成误检测。本文使用“减背景”方法进行目标的粗检测, 得到一个大致目标区域, 在此区域内应用边缘检测方法进行详细的目标边缘检测, 最后填充得到精确的目标区域。SUSAN 边缘检测算法不需要对图像求导, 具有较强的抗噪能力, 本文在“减背景”方法的基础上, 在获得的目标区域内进行文献[14]中的改进 SUSAN 边缘检测算法提取目标边缘, 经形态学填充后获得精确目标区域。图 6 为本文精确目标探测实验的结果。

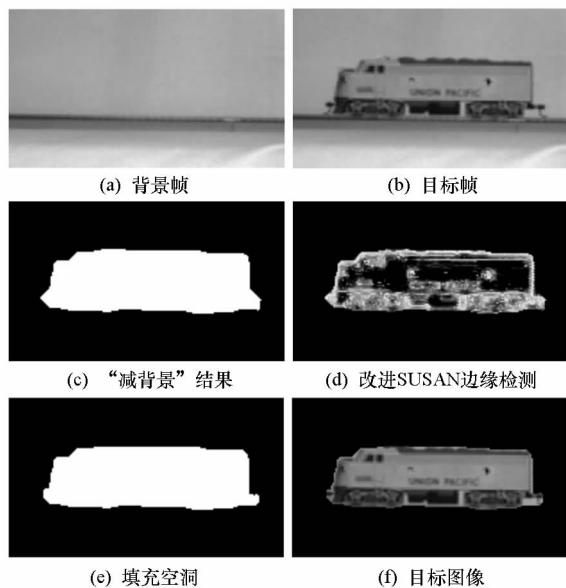


图 6 基于“减背景”方法和 SUSAN 边缘提取的精确目标探测结果

Fig. 6 Accurate target detection result based on background subtraction and SUSAN

4.2 亚像素精度的立体视觉运动测量

完成运动目标的检测之后, 需要对运动目标在各帧中的位置进行定位, 进而测量出运动目标的运动轨迹。因为运动测量相机与编码曝光相机存在分辨率上的差异, 必须使用亚像素精度的运动测量方法测量相机与场景之间的运动距离。通常使用单目视频进行运动测量只能获得图像像素位移, 对于本文利用视频运动测量计算高分辨率相

机曝光时间内运动轨迹的目的,必须使用双目立体视觉获得场景点的真实运动,才能通过摄像机之间的映射关系准确获得高分辨率图像的运动。

在众多亚像素定位技术中,数字相关法具有原理简单、直观、适应性强和精度高等优点,是亚像素定位技术中最重要、最常用的方法^[15]。由图 4 可知,在编码曝光相机曝光的开始时刻、中间时刻和结束时刻,双目立体视觉相机分别采集了 3 幅双目图像,我们将相邻的两幅双目图像标记为

$$I_{start}^{left}, I_{start}^{right}, I_{end}^{left}, I_{end}^{right}。$$

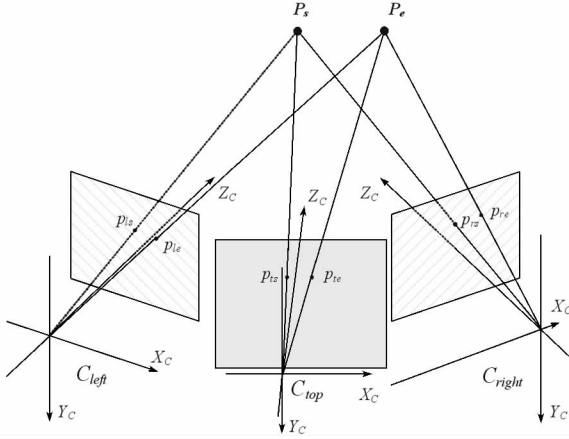


图 7 基于立体视觉的运动测量方法

Fig. 7 Motion measurement based on stereo vision

如图 7 所示,本文测量方法具体步骤如下:

步骤 1: 在 4.1 节中探测到的运动目标区域内,选择 I_{start}^{left} 图像中一个区域(本文采用 15 像素 \times 15 像素大小的矩形模板)作为特征模板,模板中心 p_{ls} 坐标 $(x_{start}^{left}, y_{start}^{left})$ 。

步骤 2: 分别在 $I_{end}^{left}, I_{start}^{right}, I_{end}^{right}$ 中使用数字相关亚像素定位方法计算出模板中心在各图像中对应点 p_{le}, p_{rs}, p_{re} 的坐标 $(x_{end}^{left}, y_{end}^{left}), (x_{start}^{right}, y_{start}^{right}), (x_{end}^{right}, y_{end}^{right})$ 。

步骤 3: 通过相同时刻左目图像和右目图像的坐标以及摄像机的内外参数计算出模板中心 p_{ls}, p_{le} 在世界坐标系中对应点 P_s, P_e 坐标 $(x_{start}^{world}, y_{start}^{world}, z_{start}^{world}), (x_{end}^{world}, y_{end}^{world}, z_{end}^{world})$ 。

步骤 4: 通过编码曝光相机外部参数将 P_s, P_e 坐标转化为编码曝光图像中对应点 p_{ls}, p_{le} 坐标 $(x_{start}, y_{start}), (x_{end}, y_{end})$, 即得运动距离 x_0, x_1 。同理可得 x_0, x_2 。

5 实验

本文实验分为 5 个步骤:①对混合编码曝光相机进行标定,获得各相机的内部参数及相对外部参数。②采用一个速度可控的火车模型作为运动目标,控制火车进行匀加速运动,使用混合编码

曝光相机对目标进行拍摄获得混合编码曝光图像,如图 3(b)所示。③采用第 4 节中方法进行运动测量。④采用第 3 节中 PSF 计算方法对编码曝光图像 PSF 进行评估。⑤采用多种方法进行图像复原实验。

实验机配置为 Pentium D 2.8GHz, 2G DDR-II 667 RAM 的 PC 机;实验平台为 Matlab2009。实验结果如图 8 所示,其中图 8(a)由上至下分别为文献[3]实验图像“Tomas Train”;匀速运动实验图像“Train 匀速”,匀加速运动实验图像“Train 加速”;图 8(b)~8(f)依次为 3 幅不同图像使用不同复原算法以及算法组合获得的复原结果。

本文主要通过以下几个方面的对比实验来验证本文方案的有效性与先进性。

1) 图像盲复原方法与本文 HCE 方法对比。本文采用 Matlab2009 内置的盲复原方法对编码曝光图像进行 20 次迭代复原,从图中可以看出,图像盲复原方法没有成功复原出可用清晰图像,并且消耗了大量的计算时间。本文 HCE 方法复原出了清晰的图像,图像局部细节(如文字)清晰可辨。

2) 本文 PSF 评估方法与 CE 方案 PSF 评估方法的 R-L 复原对比。本文采用 Matlab2009 内置 R-L 复原方法,分别用本文的 PSF 估计算法获得 PSF 和文献[3]方法获得 PSF 并缩放图像的方式进行编码曝光图像复原,从复原结果可以看出,对于匀速运动图像,二者均可以对表面的文字较好地复原,但对匀加速度运动图像,CE 方法则不能较好地复原出表面文字。两种方法的复原图像边缘具有较强的振铃效应,整体效果不够理想。

3) CE 方法与本文 HCE 方法对比。CE 方法与本文 HCE 方法的差距主要体现在 PSF 的获取方面和复原图像的分辨率方面。本文 PSF 计算方法较 CE 方法具有更强的适应性,从图 8(e)中可以看出,在运动目标加速度较大时,CE 方法已不能有效复原出清晰图像,但本文算法依然能够得到较为清晰的图像。本文方法计算获得完成的 PSF 并没有受到 CE 方法两次分辨率缩放造成的分辨率损失,因此,复原结果较 CE 复原结果具有更高的空间分辨率。另外,本文采用了基于立体视觉的亚像素运动测量方法自动计算出编码曝光运动模糊图像的运动参数,可以完全自动地对模糊图像进行处理,而 CE 方法需要人工估计运动距离,本文方法更具实用价值。

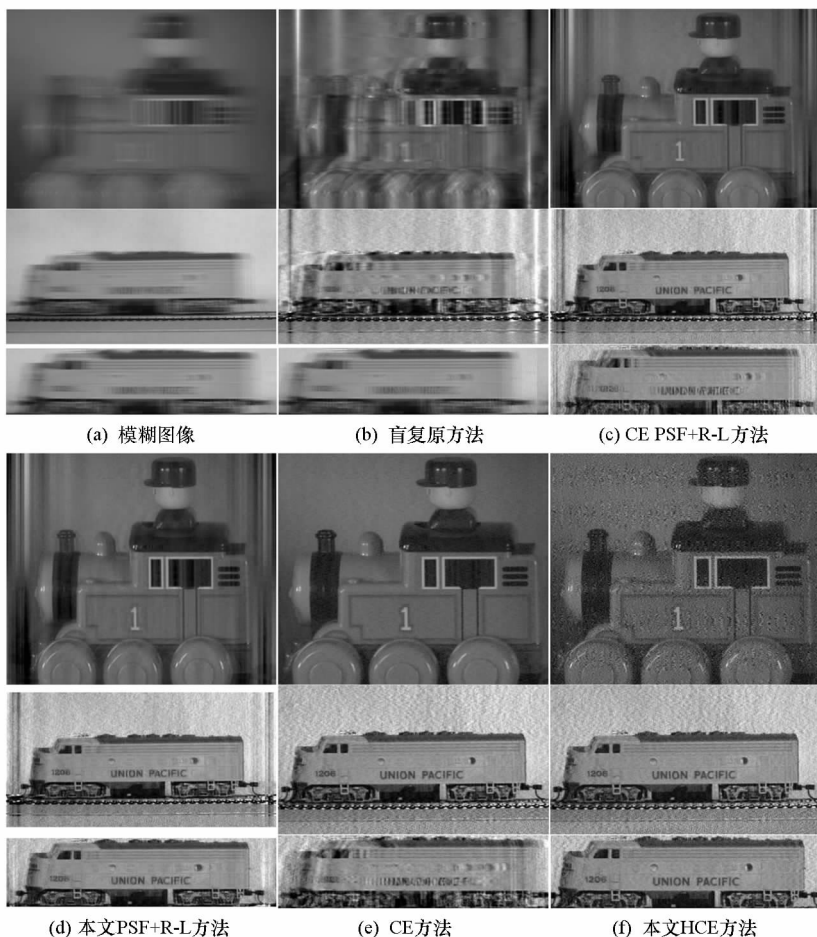


图 8 试验结果及对比

Fig. 8 Experiment results and comparison

表 1 时间效率对比 (s)

Tab.1 Compare of time efficiency (s)

图像	分辨率 (像素 × 像素)	盲复原	R - L + CE PSF	R - L + HCE PSF	CE	HCE
TomasTrain	830 × 613	125.758	25.987	55.694	1.524	1.910
Train 匀速	1188 × 600	91.792	28.378	42.301	2.095	2.920
Train 加速	1159 × 321	50.634	15.247	22.131	1.101	1.521

从表 1 中的时间效率比较中可以看出,本文 HCE 方法和 CE 方法在图像复原的时间效率上较盲复原方法和 R - L 方法具有较大的优势,由于采用原始分辨率进行复原处理,本文以牺牲一部分时间效率为代价换取了空间分辨率的保留,因此本文算法在时间效率上稍差于 CE 方法,经过程序优化后有望达到实时处理能力。

6 结论

针对图像运动模糊复原的两个难以解决的问题,提出一种基于混合编码曝光相机的运动模糊复原方法 HCE,通过双目立体视觉相机进行运动测量指导编码曝光相机进行 PSF 估计,通过编码曝光模式解决传统曝光模式反卷积的不可逆问

题,从而实现了图像运动模糊直接反卷积的快速复原算法。设计了混合编码曝光相机技术框架,利用该框架,可以自动地对编码曝光相机获得图像进行复原,而不需要进行人工干预,提高了编码曝光方法的实用性。设计了一种用于编码曝光的 PSF 计算方法,该方法获得运动模糊图像的 PSF 与图像模糊尺寸一致,避免了 CE 中由于图像缩放带来的分辨率损失问题。本文方法可以有效复原加速运动模糊图像,扩展了 CE 方法的适用范围。混合编码曝光相机可以用于对高速运动物体的拍摄以及高速运动平台对固定场景的拍摄等应用。

Propulsion Conference and Exhibit. Fort Lauderdale, Florida, 2004.

[4] Marchetti J P, Blandino J J, Demetriou A M. Electric Propulsion and Controller Design for Drag-free Spacecraft Operation in Low Earth Orbit [C] // 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Sacramento, California, 2006.

[5] Canuto E, Massotti L. All-propulsion Design of the Drag-free and Attitude Control of the European Satellite GOCE [J]. Acta Astronautica, 2009, 64: 325 - 344.

[6] Crassidis L J, Markley L F, Tobin C A, et al. Nonlinear Predictive Control of Spacecraft [C] // Reno, NV: AIAA, Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 35th, 1997.

[7] Shearer M C, Heise A S. Constrained Model Predictive Control of a Nonlinear Aerospace System [C] // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Collection of Technical Papers. Boston, MA, Pt. 2, 1998: 772 - 785.

[8] Prieto D, Ahmad Z. A Drag Free Control based on Model Predictive Technics [C] // 2005 American Control Conference, Portland, OR USA, 2005: 1527 - 1532.

(上接第 83 页)

参考文献:

[1] Schuon S, Diepold K. Comparison of Motion Deblur Algorithms and Real World Deployment [J]. Acta Astronautica, 2009, 64 (11/12): 1050 - 1065.

[2] Ben-Ezra M, Nayar S K. Motion-based Motion Deblurring [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(6): 689 - 698.

[3] Raskar R, Agrawal A, Tumblin J, et al. Coded Exposure Photography: Motion Deblurring Using Fluttered Shutter [C] // Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006. Boston, Massachusetts; ACM, 2006: 795 - 804.

[4] Yuan L, Sun J, Quan L, et al. Image Deblurring with Blurred/Noisy Image Pairs [C] // Proceedings of ACM SIGGRAPH 2007. San Diego, California; ACM, 2007: 1 - 8.

[5] Levin A, Sand P, Cho T S, et al. Motion Invariant Photography [C] // Proceedings of ACM SIGGRAPH 2008. Los Angeles, California; ACM, 2008, 27(3): 1 - 8.

[6] Agrawal A, Xu Y, Raskar R. Invertible Motion Blur in Video [C] // Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009. New Orleans, LA, USA; ACM, 2009: 95 - 1 - 8.

[7] Lucy L B. An Iterative Technique for the Rectification of Observed Distributions [J]. Astronomical Journal. 1974, 79 (6): 745 - 754.

[8] Joshi N, Kang S B, Lawrence Z C, et al. Image Deblurring using Inertial Measurement Sensors [C] // Proceedings of ACM SIGGRAPH 2010, Los Angeles, California; ACM, 2010: 30 - 1 - 9.

[9] 邹谋彦. 反卷积与信号复原 [M]. 北京: 国防工业出版社. 2001.

[10] External Trigger Modes Supported by Point Grey Cameras [EB/OL]. [2011 - 12 - 05] <http://www.ptgrey.com/support/kb/index.asp?a=4&q=239>

[11] Point Grey camera [EB/OL]. [2011 - 12 - 05]. <http://www.ptgrey.com>

[12] Arduino Duemilanove [EB/OL]. [2011 - 12 - 05]. <http://www.arduino.cc/>

[13] Camera Calibration Toolbox for Matlab [EB/OL]. [2011 - 12 - 05]. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/

[14] 于起峰, 陆宏伟, 刘肖林. 基于图像的精密测量与运动测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[15] 于起峰, 尚阳. 摄像测量学原理与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.