

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局



(10) 国际公布号

WO 2018/227882 A1

(43) 国际公布日

2018 年 12 月 20 日 (20.12.2018)

WIPO | PCT

(51) 国际专利分类号:

G06T 5/00 (2006.01)

广东省深圳市南山区西丽镇丽水路深圳大学城
北大校区, Guangdong 518055 (CN)。

(21) 国际申请号:

PCT/CN2017/111996

(74) 代理人: 北京万象新悦知识产权代理事务
所(普通合伙)(BEIJING WANXIANGXIN YUE
INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE); 中国北京
市海淀区颐和园路1号北京资源燕园宾馆
六层1625号, Beijing 100080 (CN)。

(22) 国际申请日:

2017 年 11 月 21 日 (21.11.2017)

(25) 申请语言:

中文

(26) 公布语言:

中文

(30) 优先权:

201710452806.8 2017年6月15日 (15.06.2017) CN

(71) 申请人: 北京大学深圳研究生院(PEKING UNIVERSITY SHENZHEN GRADUATE
SCHOOL) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山
区西丽镇丽水路深圳大学城北大校区,
Guangdong 518055 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家
保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,
BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU,
CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS,
JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,
LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(72) 发明人: 李革(LI, Ge); 中国广东省深圳市南山区
西丽镇丽水路深圳大学城北大校区, Guangdong
518055 (CN)。 张毅伟(ZHANG, Yiwei); 中国广

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,

(54) Title: A PRIORI CONSTRAINT AND OUTLIER SUPPRESSION BASED IMAGE DEBLURRING METHOD

(54) 发明名称: 基于先验约束和离群值抑制的图像去模糊方法

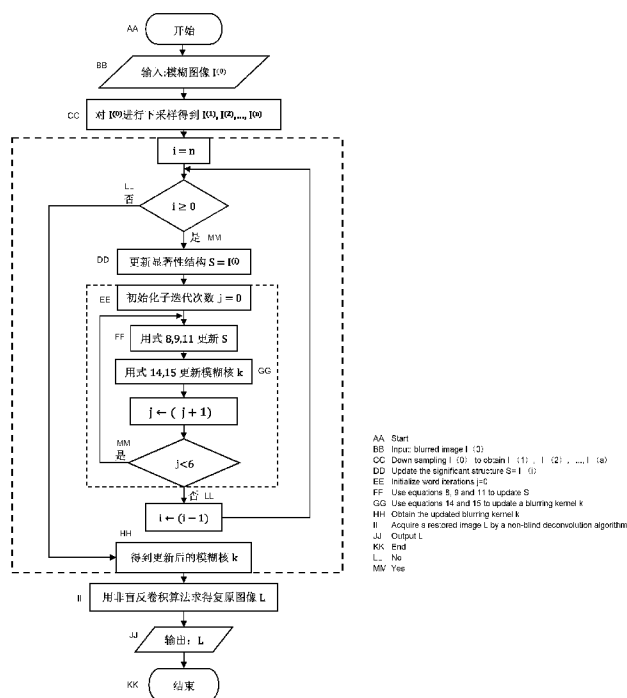


图2

(57) Abstract: Provided is an a priori constraint and outlier suppression based image deblurring method. A convolution model is used for fitting a blurring process of a clear image and then the blurred image I is restored, so that the purpose of image deblurring is achieved. The method comprises an evaluation process of the significant structure of a blurred image, a process of blurring kernel estimation and outlier suppression, and a process of restoring the blurred image by non-blind deconvolution. The significant structure in the blurred image is obtained by use of L0 norm constraint and heavy-tailed a priori information. Specifically, the L0 norm constraint is used to evaluate the blurring kernel. The evaluated blurring kernel is subjected to outlier suppression. The final restored image is obtained by using a non-blind deconvolution algorithm. The present invention can solve the problems of the existing algorithms: a priori assumption is incorrect; a priori constraint is inappropriate; and the blurring kernel has outliers and the like. Therefore the present invention can prominently improve the restoration level of the blurred image.

NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布：

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要：提供了一种图像去模糊方法，基于先验约束和离群值抑制，采用卷积模型来拟合清晰图像的模糊过程，再对模糊图像I进行复原，由此达到图像去模糊的目的；包括模糊图像显著性结构评估过程、模糊核估计及其离群值抑制过程、非盲反卷积模糊图像复原过程；利用L0范数约束和重尾先验信息获得模糊图像中的显著性结构；具体采用L0范数约束对模糊核进行评估；对评估的模糊核进行离群值抑制；采用非盲反卷积算法得到最终的复原图像。本发明能够解决现有算法中存在的先验假设不准确、先验约束不合适，以及模糊核中存在离群值的问题，能够明显提高模糊图像的复原水平。

基于先验约束和离群值抑制的图像去模糊方法

技术领域

本发明涉及数字图像处理技术，尤其涉及一种基于先验约束和离群值抑制的图像去模糊方法。

背景技术

去模糊技术是图像和视频处理领域被广泛研究的主题。基于相机抖动造成的模糊在一定意义上严重影响图像的成像质量和视觉观感。作为图像预处理领域一个极其重要的分支，去模糊技术的提升直接影响其他计算机视觉算法的性能，如前景分割、物体检测、行为分析等；同时它也影响着图像的编码性能。因此，开发高性能的去模糊算法具有重要作用。

通常情况下可用卷积模型来解释模糊成因，相机抖动的过程可以映射为模糊核轨迹 PSF(Point Spread Function)。在模糊核未知的情况下还原清晰图像，这一问题属于不适定 (ill-posed) 问题，所以，通常意义上需要先估计模糊核，再利用评估的模糊核进行反卷积操作得到复原图像。目前，常用算法包括基于 MAP 的 EM 算法；原始的 $\text{MAP}_{x,k}$ (其中 x 表示清晰图像， k 表示模糊核) 算法很多情况下会将模糊图像作为非模糊解释 (no-blur explanation)，这使得评估图像和模糊核依次迭代过程的失败；之后的 MAP_k (k 表示模糊核) 算法是 $\text{MAP}_{x,k}$ 的改进，它解决了非模糊解释的问题，这一算法首先估计出模糊核，之后再利用非盲反卷积 (non-blind deconvolution) 进行图像的复原。然而，以上算法都存在先验约束不足或不合适的问题，同时，评估的模糊核存在离群值这一问题也没有得到很好的解决，这一细微的差别很可能会造成去模糊过程的失败。

综上所述，现有的去模糊算法存在的缺点包括：(一) 先验假设不准确；(二) 先验约束不合适；(三) 模糊核中存在的离群值未得到很好的抑制，这是由于相机抖动的过程是连续的，这就决定了模糊核轨迹的连续性，因此，模糊核中存在的离群值一定会造成反卷积过程的失败。

发明内容

为了克服上述现有技术的不足，本发明提出了一种基于先验约束和离群值抑制的图像去模糊方法，解决现有算法中存在的先验假设不准确、先验约束不合适，以及模糊核中存在离群值的问题，通过解决以上这些问题，本发明能够明显提高模糊图像的复原水平。

本发明的原理是：提出一种基于先验信息约束和离群值抑制的去模糊算法，旨在解决现有算法中存在的先验假设不准确、先验约束不合适，以及模糊核中存在离群值的问题。具体是在 MAPk 算法思想的基础上，基于先验约束和离群值抑制，实现图像去模糊；首先，利用 L0 范数约束以及重尾先验信息获得模糊图像中的显著性结构；其次，在显著性结构的基础上，采用 L0 范数约束对模糊核进行评估；然后，对评估的模糊核进行离群值抑制；最后，采用非盲反卷积算法得到最终的复原图像。本发明方法通过解决现有算法中存在的先验假设不准确、先验约束不合适，以及模糊核中存在离群值的问题，能够有效地提高模糊图像的复原。

本发明提供的技术方案是：

一种基于先验约束和离群值抑制的图像去模糊方法，采用卷积模型来拟合清晰图像的模糊过程，包括模糊图像显著性结构评估、模糊核估计及其离群值抑制、非盲反卷积模糊图像复原过程；

1) 模糊图像显著结构评估过程，具体包括如下步骤：

11) 采用式 1 的卷积模型来拟合清晰图像的模糊过程：

$$I = L \otimes k + \eta \quad (\text{式 1})$$

其中，I 表示模糊图像，k 表示模糊核， η 表示噪声（我们假设其分布为高斯噪声）；

采用重尾效应的先验约束作为模糊图像显著型结构梯度的分布情况，见式 2：

$$\min_S \|S \otimes k - L\|^2 + \lambda_1 \|\nabla S\|^{0.5} \quad (\text{式 2})$$

其中，S 为模糊图像的显著性结构（并不是待还原的图像），用来辅助评估模糊核 k；式 2 的第一项可以看成是损失函数（虽然这样会造成式 2 值变大，但本发明要评估的是使优化方程达到最小的值 S，所以不影响优化过程）；式 2 的第二项是用超拉普拉斯来模拟重尾效应；

12) 评估模糊图像显著性结构：

引入 L0 范数对模糊图像的显著性结构 S 的纹理进行约束，同时利用 L2 范数限制 S 中平滑区域的噪声，更新后的公式如式 3：

$$\min_S \|S \otimes k - L\|^2 + \lambda_1 \|\nabla S\|^{0.5} + \lambda_2 \|\nabla S \circ M\|_0 + \lambda_3 \|\nabla S \circ (1 - M)\|_2^2 \quad (\text{式 3})$$

其中，M 是对模糊图像显著性结构 S 中纹理的二值标定，(1-M) 是对 S 中平滑区域的二值标定；式 3 的后两项（即第三项和最后一项）用来进行纹理约束，其中第三项对大尺寸

细节进的约束，最后一项是对平滑的约束；

我们用式 4 和式 5 对 M 进行定义：

$$r(x) = \frac{\|\sum_{y \in N_h(x)} \nabla S(y)\|}{\sum_{y \in N_h(x)} \|\nabla S(y)\| + 0.5} \quad (\text{式 4})$$

$$M = H(r - \tau_r) \quad (\text{式 5})$$

式 4 中, x 表示像素点的位置, y 表示以像素点为中心, 窗口大小为 N_h 范围内的像素点, $r(x)$ 表示位置 x 处的像素点属于纹理部分的程度; 利用式 4 可以对 S 中的纹理做初步的划分, $r(x)$ 的取值在 $(0, 1)$, $r(x)$ 越大, 表示 x 属于纹理部分的可能行越大; 同时式 4 又限制了突变纹理的出现 (因为当模糊核尺寸大于模糊图像细节尺寸时, 图像复原失败, 因此需要限制突变纹理)。式 5 中 M 用 Heaviside 阶跃函数来求取, 其中 τ_r 表示像素点属于纹理部分的程度 $r(x)$ 的阈值, 它用来区分显著性结构 S 中的纹理区域和平滑区域, 本发明中我们采用直方图均衡的方法来获取 τ_r 。

13) 求解模糊图像显著性结构, 具体如下:

为求解式 3, 引入两个替代变量 u 和 w 来选择性替代 ∇S , 并用迭代的方法来更新 S , 式 3 的变种如下:

$$\min_{S, u, w} \|S \otimes k - L\|^2 + \lambda_1 \|w\|^{0.5} + \lambda_2 \|u \circ M\|_0 + \lambda_3 \|u \circ (1 - M)\|_2^2 + \beta \|u - \nabla S\|_2^2 + \gamma \|w - \nabla S\|_2^2 \quad (\text{式 6})$$

我们用交替更新的方法获得每一次迭代 S , u 和 w 的解;

变量 u 的求解:

$$\min_u \lambda_2 \|u \circ M\|_0 + \lambda_3 \|u \circ (1 - M)\|_2^2 + \beta \|u - \nabla S\|_2^2 \quad (\text{式 7})$$

$$u = \begin{cases} \frac{\beta}{\lambda_3 + \beta} \nabla S, & M = 0 \\ \nabla S, & M \neq 0, \nabla S^2 \geq \frac{\lambda_2}{\beta} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (\text{式 8})$$

变量 w 的求解:

$$\min_w \lambda_1 \|w\|^{0.5} + \gamma \|w - \nabla S\|_2^2 \quad (\text{式 9})$$

我们采用相对全偏差 RTV (Relative Total Variation) 的方法来求解式 9;

模糊图像显著性结构变量 S 的求解如下:

$$\min_S ||S \otimes k - L||^2 + \lambda_1 ||w||^{0.5} + \beta ||u - \nabla S||_2^2 + \gamma ||w - \nabla S||_2^2 \quad (\text{式 } 10)$$

基于帕斯瓦尔定理，将式 10 经过傅里叶变换之后求得 S：

$$S = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{\mathcal{F}(I) \circ \bar{\mathcal{F}}(k) + \beta \mathcal{F}(u) \circ \bar{\mathcal{F}}(\nabla) + \gamma \mathcal{F}(w) \circ \bar{\mathcal{F}}(\nabla)}{\mathcal{F}(k) \circ \bar{\mathcal{F}}(k) + \beta \mathcal{F}(\nabla) \circ \bar{\mathcal{F}}(\nabla) + \gamma \mathcal{F}(\nabla) \circ \bar{\mathcal{F}}(\nabla)} \right) \quad (\text{式 } 11)$$

其中， $\mathcal{F}$ 表示傅里叶变换， $\mathcal{F}^{-1}$ 表示傅里叶逆变换。

2) 模糊核估计及其离群值抑制过程，具体如下：

本发明采用梯度信息和显著性结构来估计模糊核，利用式 14 和 15 迭代更新得到模糊核轨迹，如图 6 所示和图 8 右图和图 9 (c) 所示。

具体地，本发明利用评估的模糊图像显著性结构 S 来进行模糊核的估计，我们采用 L0 范数对模糊核中的离群值进行限制，优化方程如下：

$$\begin{aligned} \min_k & ||\nabla S \otimes k - \nabla I||_2^2 + \psi_1 ||k||_2^2 + \psi_2 ||\nabla k||_0 \\ \text{s.t. } & k \geq 0, ||k||_1 = 1 \end{aligned} \quad (\text{式 } 12)$$

类似地，我们引入替换变量 v 进行迭代更新，式 12 的变种如下：

$$\min_{v, k} ||\nabla S \otimes k - \nabla I||_2^2 + \psi_1 ||k||_2^2 + \psi_2 ||v||_0 + \varphi ||v - \nabla k||_2^2 \quad (\text{式 } 13)$$

对于以上两个变量 (v 和 k) 求解如下：

$$v = \begin{cases} \nabla k, & \nabla k^2 \geq \frac{\psi_2}{\varphi} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (\text{式 } 14)$$

$$k = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{\mathcal{F}(\nabla I) \circ \bar{\mathcal{F}}(\nabla S) + \varphi \mathcal{F}(v) \circ \bar{\mathcal{F}}(\nabla)}{\mathcal{F}(\nabla S) \circ \bar{\mathcal{F}}(\nabla S) + \varphi \mathcal{F}(\nabla) \circ \bar{\mathcal{F}}(\nabla)} \right) \quad (\text{式 } 15)$$

3) 模糊图像复原过程，具体如下：

利用估计出的模糊核，采用非盲反卷积技术对模糊图像进行复原操作。

本发明实施方案中采用 Richardson-Lucy 算法来实现非盲反卷积，参见文献 1 (Perrone, Daniele, and Paolo Favaro. "Total variation blind deconvolution: The devil is in the details." Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2014)。

与现有技术相比，本发明的有益效果是：

本发明提出了一种基于先验约束和离群值抑制的图像去模糊方法，利用 L0 范数约束以及重尾先验信息获得模糊图像中的显著性结构；在显著性结构的基础上，采用 L0 范数约束

对模糊核进行评估；对评估的模糊核进行离群值抑制；采用非盲反卷积算法得到最终的复原图像。本发明能够解决现有算法中存在的先验假设不准确、先验约束不合适，以及模糊核中存在离群值的问题，通过解决以上这些问题，本发明能够明显提高模糊图像的复原水平。

附图说明

图 1 是本发明具体实施的流程示意图；

图 2 是本发明方法的流程框图；

其中， k^n 表示最小尺寸图像评估得到的模糊核， k^0 表示最终得到的评估模糊核。

图 3 是本发明实施例中模糊图像显著性结构的纹理图；

其中，(a) 为原始模糊图像；(b) 为原始模糊图像梯度分布情况；(c) 为梯度直方图分布；(d) 是用颜色信息表示的 r 值能量图、即原始图像 $r(x)$ 的取值分布图。

图 4 是本发明实施例中模糊图像的显著性结构示例图。

图 5 是本发明实施例中不同尺寸下模糊图像的显著性结构；

其中，(a) ~ (d) 为不同尺寸下模糊图像。

图 6 是本发明实施例迭代更新得到的模糊核。

图 7 是本发明实施例模糊图像复原后的图像。

图 8 是本发明实施例中模糊图像及其复原图像放大的对比图。

图 9 是本发明实施例中模糊图像、显著性结构、复原图的对比；

其中，图 (a) 为原始模糊图像；图 (b) 为显著性结构；图 (c) 为模糊复原图像。

具体实施方式

下面结合附图，通过实施例进一步描述本发明，但不以任何方式限制本发明的范围。

本发明提出的基于先验约束和离群值抑制的去模糊方法流程图如图 2 所示，图中， k^n 表示最小尺寸图像评估得到的模糊核， k^0 表示最终得到的评估模糊核。本发明方法利用多次采样的方式不断迭代更新模糊核，并利用非盲反卷积算法获得最终的复原图像。

本发明方法具体步骤如下：

表 1 是以下步骤中采用的参数名称及其相应参数含义说明

表 1 参数列表

参数名称	说明
λ_1	显著性结构 S 评估过程中替换变量 w 的系数

λ_2	显著性结构 S 评估过程中纹理区域的系数
λ_3	显著性结构 S 评估过程中平滑区域的系数
ψ_1	模糊核评估过程中模糊核 k 的权重
ψ_2	模糊核评估过程中替换变量 v 的权重
γ	显著性结构 S 评估过程中迭代更新的权重
β	显著性结构 S 评估过程中迭代更新的权重
φ	模糊核评估过程中迭代更新的权重

步骤 1. 模糊模型选择：本发明采用式 1 模型，并假设噪声服从高斯分布，得到如式 2 的优化方程：

本发明采用卷积模型来拟合清晰图像的模糊过程，如式 1：

$$I = L \otimes k + \eta \quad (\text{式 1})$$

其中，I 表示模糊图像，k 表示模糊核， η 表示噪声（我们假设其分布为高斯噪声）。

采用重尾效应的先验约束作为模糊图像显著型结构梯度的分布情况，见式 2：

$$\min_S \|S \otimes k - L\|^2 + \lambda_1 \|\nabla S\|^{0.5} \quad (\text{式 2})$$

其中，S 为模糊图像的显著性结构；

步骤 2. 模糊图像显著性结构评估：

首先，利用式 4 和式 5 得到显著性结构的纹理标定，如图 3（d）所示；图 3 是实施例中模糊图像显著性结构的纹理图；其中，（a）为原始模糊图像；（b）为原始模糊图像梯度分布情况；（c）为梯度直方图分布；（d）为原始图像 $r(x)$ 的取值分布。利用式 4 和式 5 得到显著性结构的纹理标定具体如下：

我们引入 L0 范数对模糊图像的显著性结构 S 的纹理进行约束，同时利用 L2 范数限制 S 中平滑区域的噪声，更新后的公式如式 3：

$$\min_S \|S \otimes k - L\|^2 + \lambda_1 \|\nabla S\|^{0.5} + \lambda_2 \|\nabla S \circ M\|_0 + \lambda_3 \|\nabla S \circ (1 - M)\|_2^2 \quad (\text{式 3})$$

其中，M 是对模糊图像显著性结构 S 中纹理的二值标定， $(1-M)$ 是对 S 中平滑区域的二值标定；我们用式 4 和式 5 对 M 进行定义：

$$r(x) = \frac{\|\sum_{y \in N_h(x)} \nabla S(y)\|}{\sum_{y \in N_h(x)} \|\nabla S(y)\| + 0.5} \quad (\text{式 4})$$

$$M = H(r - \tau_r) \quad (\text{式 5})$$

式 4 中, x 表示像素点的位置, y 表示以像素点为中心, 窗口大小为 N_h 范围内的像素点, $r(x)$ 表示位置 x 处的像素点属于纹理部分的程度; 利用式 4 可以对 S 中的纹理做初步的划分, $r(x)$ 的取值在 $(0, 1)$, $r(x)$ 越大, 表示 x 属于纹理部分的可能行越大; 同时式 4 又限制了突变纹理的出现 (因为当模糊核尺寸大于模糊图像细节尺寸时, 图像复原失败, 因此需要限制突变纹理)。式 5 中 M 用 Heaviside 阶跃函数来求取, 其中 τ_r 表示 r 的阈值, 它用来区分显著性结构 S 中的纹理区域和平滑区域, 本发明中我们采用直方图均衡的方法来获取 τ_r 。

其次, 利用式 8, 9, 11 迭代更新得到模糊图像显著性结构, 如图 4 所示; 图 5 为不同尺寸下估计得到的显著性结构; 具体如下:

为求解式 3, 我们引入两个替代变量 u 和 w 来选择性替代 ∇S , 并用迭代的方法来更新 S , 式 3 的变种如下:

$$\min_{S,u,w} \|S \otimes k - L\|^2 + \lambda_1 \|w\|^{0.5} + \lambda_2 \|u \circ M\|_0 + \lambda_3 \|u \circ (1 - M)\|_2^2 + \beta \|u - \nabla S\|_2^2 + \gamma \|w - \nabla S\|_2^2 \quad (\text{式 6})$$

我们用交替更新的方法获得每一次迭代 S , u 和 w 的解;

变量 u 的求解:

$$\min_u \lambda_2 \|u \circ M\|_0 + \lambda_3 \|u \circ (1 - M)\|_2^2 + \beta \|u - \nabla S\|_2^2 \quad (\text{式 7})$$

$$u = \begin{cases} \frac{\beta}{\lambda_3 + \beta} \nabla S, & M = 0 \\ \nabla S, & M \neq 0, \nabla S^2 \geq \frac{\lambda_2}{\beta} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (\text{式 8})$$

变量 w 的求解:

$$\min_w \lambda_1 \|w\|^{0.5} + \gamma \|w - \nabla S\|_2^2 \quad (\text{式 9})$$

我们采用相对全偏差 RTV (Relative Total Variation) 的方法来求解式 9;

变量 S 的求解:

$$\min_S \|S \otimes k - L\|^2 + \lambda_1 \|w\|^{0.5} + \beta \|u - \nabla S\|_2^2 + \gamma \|w - \nabla S\|_2^2 \quad (\text{式 10})$$

基于帕斯瓦尔定理, 我们将式 10 经过傅里叶变换之后求得 S :

$$S = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{\mathcal{F}(L) \circ \bar{\mathcal{F}}(k) + \beta \mathcal{F}(u) \circ \bar{\mathcal{F}}(\nabla) + \gamma \mathcal{F}(w) \circ \bar{\mathcal{F}}(\nabla)}{\mathcal{F}(k) \circ \bar{\mathcal{F}}(k) + \beta \mathcal{F}(\nabla) \circ \bar{\mathcal{F}}(\nabla) + \gamma \mathcal{F}(\nabla) \circ \bar{\mathcal{F}}(\nabla)} \right) \quad (\text{式 11})$$

其中, $\mathcal{F}$ 表示傅里叶变换, $\mathcal{F}^{-1}$ 表示傅里叶逆变换。

步骤 3. 模糊核估计, 具体如下:

本发明采用梯度信息和显著性结构来估计模糊核, 利用式 14 和 15 迭代更新得到模糊核轨迹, 如图 6 所示和图 8 右图和图 9 (c) 所示。

具体地, 本发明利用评估的模糊图像显著性结构 S 来进行模糊核的估计, 我们采用 L0 范数对模糊核中的离群值进行限制, 优化方程如下:

$$\begin{aligned} \min_k & \|\nabla S \otimes k - \nabla I\|_2^2 + \psi_1 \|k\|_2^2 + \psi_2 \|\nabla k\|_0 \\ \text{s.t. } & k \geq 0, \|k\|_1 = 1 \end{aligned} \quad (\text{式 12})$$

类似地, 我们引入替换变量 v 进行迭代更新, 式 12 的变种如下:

$$\min_{v, k} \|\nabla S \otimes k - \nabla I\|_2^2 + \psi_1 \|k\|_2^2 + \psi_2 \|v\|_0 + \varphi \|v - \nabla k\|_2^2 \quad (\text{式 13})$$

对于以上两个变量求解如下:

$$v = \begin{cases} \nabla k, & \nabla k^2 \geq \frac{\psi_2}{\varphi} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (\text{式 14})$$

$$k = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{\mathcal{F}(\nabla I) \circ \overline{\mathcal{F}}(\nabla S) + \varphi \mathcal{F}(v) \circ \overline{\mathcal{F}}(\nabla)}{\mathcal{F}(\nabla S) \circ \overline{\mathcal{F}}(\nabla S) + \varphi \mathcal{F}(\nabla) \circ \overline{\mathcal{F}}(\nabla)} \right) \quad (\text{式 15})$$

步骤 4. 非盲反卷积, 具体如下:

此处可采用任何现有的非盲反卷积算法。

以上步骤可表示为如下算法流程:

算法: 基于先验约束和离群值抑制的去模糊算法

输入: 模糊图像 I

输出: 模糊核 k , 模糊复原图像 L

开始:

对模糊图像图像进行下采样 $I^{(0)} \rightarrow I^{(1)}, \dots, I^{(n-1)}, I^{(n)}$ (其中 $I^{(n)}$ 具有最小尺寸);

对最小尺寸模糊图像对应的模糊核进行初始化;

迭代:

更新模糊图像 $I^{(n)} \rightarrow S$;

迭代:

显著性结构估计:

用式 8 求解 u ;

用式 9 求解 w ;

用式 11 求解显著性结构 S ;
模糊核估计;
用式 14 求解 v ;
用式 15 求解 k ;
迭代次数达到 6 停止;
 $n-1 \rightarrow n$;
直到 $n=0$ 停止;
用非盲反卷积算法求得复原图像 L .

本发明实施方案中，非盲反卷积具体采用文献 1 (Perrone, Daniele, and Paolo Favaro. "Total variation blind deconvolution: The devil is in the details." *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2014) 中提出的算法，如图 7 所示，其为图 3 中模糊图像的复原图像；另以图 8 为例，左图为模糊图像及其放大区域，右图为复原效果及对应的放大区域。其中模糊核以能量图的形式表示在右图左上角。

需要注意的是，公布实施例的目的在于帮助进一步理解本发明，但是本领域的技术人员可以理解：在不脱离本发明及所附权利要求的精神和范围内，各种替换和修改都是可能的。因此，本发明不应局限于实施例所公开的内容，本发明要求保护的范围以权利要求书界定的范围为准。

权 利 要 求 书

1、一种图像去模糊方法，基于先验约束和离群值抑制，采用卷积模型来拟合清晰图像的模糊过程，再对模糊图像 I 进行复原，由此达到图像去模糊的目的；包括模糊图像显著性结构评估过程、模糊核估计及其离群值抑制过程、非盲反卷积模糊图像复原过程；

1) 模糊图像 I 的显著结构评估过程，包括如下步骤：

11) 采用重尾效应的先验约束作为模糊图像显著型结构梯度的分布情况，如式 2：

$$\min_S \|S \otimes k - L\|^2 + \lambda_1 \|\nabla S\|^{0.5} \quad (\text{式 } 2)$$

其中， S 为模糊图像的显著性结构（并不是待还原的图像），用来辅助评估模糊核 k ；式 2 的第一项可看成是损失函数；式 2 的第二项是用超拉普拉斯来模拟重尾效应；

12) 评估模糊图像显著性结构：

引入 L_0 范数对模糊图像的显著性结构 S 的纹理进行约束，同时利用 L_2 范数限制 S 中平滑区域的噪声，更新后如式 3：

$$\min_S \|S \otimes k - L\|^2 + \lambda_1 \|\nabla S\|^{0.5} + \lambda_2 \|\nabla S \circ M\|_0 + \lambda_3 \|\nabla S \circ (1 - M)\|_2^2 \quad (\text{式 } 3)$$

其中， M 是对模糊图像显著性结构 S 中纹理的二值标定， $(1-M)$ 是对 S 中平滑区域的二值标定；式 3 中第三项对大尺寸细节进的约束，最后一项是对平滑的约束；

13) 求解模糊图像显著性结构，具体如下：

为求解式 3，引入两个替代变量 u 和 w 来选择性替代 ∇S ，式 3 的变种为式 6：

$$\min_{S, u, w} \|S \otimes k - L\|^2 + \lambda_1 \|w\|^{0.5} + \lambda_2 \|u \circ M\|_0 + \lambda_3 \|u \circ (1 - M)\|_2^2 + \beta \|u - \nabla S\|_2^2 + \gamma \|w - \nabla S\|_2^2 \quad (\text{式 } 6)$$

用交替更新的方法获得每一次迭代 S 、 u 和 w 的解；再经过傅里叶变换之后求得模糊图像显著性结构 S 并更新；

2) 模糊核估计及其离群值抑制过程：采用梯度信息和显著性结构 S 来估计模糊核 k ，通过迭代更新估计得到模糊核 k 的轨迹；

3) 模糊图像复原过程：利用估计出的模糊核，采用非盲反卷积方法对模糊图像进行复原操作。

2、如权利要求 1 所述图像去模糊方法，其特征是，步骤 12) 用式 4 和式 5 对模糊图像显著性结构 S 中纹理的二值标定 M 进行定义：

$$r(x) = \frac{\|\sum_{y \in N_h(x)} \nabla S(y)\|}{\sum_{y \in N_h(x)} \|\nabla S(y)\| + 0.5} \quad (\text{式 } 4)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{H}(\mathbf{r} - \tau_r) \quad (\text{式 } 5)$$

式 4 中, $\mathbf{x}$ 表示像素点的位置; $\mathbf{y}$ 表示以像素点为中心, 窗口大小为 N_b 范围内的像素点; $r(\mathbf{x})$ 表示位置 $\mathbf{x}$ 处的像素点属于纹理部分的程度; 利用式 4 对 $\mathbf{S}$ 中的纹理做初步的划分, $r(\mathbf{x})$ 的取值在 $(0, 1)$, $r(\mathbf{x})$ 越大, 表示 $\mathbf{x}$ 属于纹理部分的可能行越大; 同时式 4 限制了突变纹理的出现; 式 5 中 $\mathbf{M}$ 用 Heaviside 阶跃函数来求取, 其中 τ_r 表示 r 的阈值, 用来区分显著性结构 $\mathbf{S}$ 中的纹理区域和平滑区域。

3、如权利要求 2 所述图像去模糊方法, 其特征是, 所述 τ_r 采用直方图均衡的方法来获取。

4、如权利要求 1 所述图像去模糊方法, 其特征是, 步骤 13) 用迭代的方法来更新 $\mathbf{S}$, 所述变量 $\mathbf{u}$ 的求解如下:

$$\min_{\mathbf{u}} \lambda_2 \|\mathbf{u} \circ \mathbf{M}\|_0 + \lambda_3 \|\mathbf{u} \circ (\mathbf{1} - \mathbf{M})\|_2^2 + \beta \|\mathbf{u} - \nabla \mathbf{S}\|_2^2 \quad (\text{式 } 7)$$

$$\mathbf{u} = \begin{cases} \frac{\beta}{\lambda_3 + \beta} \nabla \mathbf{S}, & \mathbf{M} = 0 \\ \nabla \mathbf{S}, & \mathbf{M} \neq 0, \nabla \mathbf{S}^2 \geq \frac{\lambda_2}{\beta} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (\text{式 } 8)$$

所述变量 $\mathbf{w}$ 的求解如下:

$$\min_{\mathbf{w}} \lambda_1 \|\mathbf{w}\|^{0.5} + \gamma \|\mathbf{w} - \nabla \mathbf{S}\|_2^2 \quad (\text{式 } 9)$$

再采用相对全偏差 RTV 方法来求解式 9;

所述变量 $\mathbf{S}$ 的求解如下:

$$\min_{\mathbf{S}} \|\mathbf{S} \otimes \mathbf{k} - \mathbf{L}\|^2 + \lambda_1 \|\mathbf{w}\|^{0.5} + \beta \|\mathbf{u} - \nabla \mathbf{S}\|_2^2 + \gamma \|\mathbf{w} - \nabla \mathbf{S}\|_2^2 \quad (\text{式 } 10)$$

基于帕斯瓦尔定理, 将式 10 经过傅里叶变换之后求得 $\mathbf{S}$:

$$\mathbf{S} = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{\mathcal{F}(\mathbf{I}) \circ \bar{\mathcal{F}}(\mathbf{k}) + \beta \mathcal{F}(\mathbf{u}) \circ \bar{\mathcal{F}}(\nabla) + \gamma \mathcal{F}(\mathbf{w}) \circ \bar{\mathcal{F}}(\nabla)}{\mathcal{F}(\mathbf{k}) \circ \bar{\mathcal{F}}(\mathbf{k}) + \beta \mathcal{F}(\nabla) \circ \bar{\mathcal{F}}(\nabla) + \gamma \mathcal{F}(\nabla) \circ \bar{\mathcal{F}}(\nabla)} \right) \quad (\text{式 } 11)$$

式 11 中, $\mathcal{F}$ 表示傅里叶变换, $\mathcal{F}^{-1}$ 表示傅里叶逆变换。

5、如权利要求 1 所述图像去模糊方法, 其特征是, 步骤 2) 具体利用评估的模糊图像显著性结构 $\mathbf{S}$ 来进行模糊核 $\mathbf{k}$ 的估计, 采用 L_0 范数对模糊核中的离群值进行限制, 优化方程如式 12:

$$\min_k \|\nabla S \otimes k - \nabla I\|_2^2 + \psi_1 \|k\|_2^2 + \psi_2 \|\nabla k\|_0 \quad (式 12)$$

$$s.t. \ k \geq 0, \|k\|_1 = 1$$

引入替换变量 v 进行迭代更新, 式 12 的变种如式 13:

$$\min_{v, k} \|\nabla S \otimes k - \nabla I\|_2^2 + \psi_1 \|k\|_2^2 + \psi_2 \|v\|_0 + \varphi \|v - \nabla k\|_2^2 \quad (式 13)$$

再通过式 14~15 对两个变量 v 、 k 求解:

$$v = \begin{cases} \nabla k, & \nabla k^2 \geq \frac{\psi_2}{\varphi} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (式 14)$$

$$k = \mathcal{F}^{-1} \left(\frac{\mathcal{F}(\nabla I) \circ \overline{\mathcal{F}(\nabla S)} + \varphi \mathcal{F}(v) \circ \overline{\mathcal{F}(\nabla)}}{\mathcal{F}(\nabla S) \circ \overline{\mathcal{F}(\nabla S)} + \varphi \mathcal{F}(\nabla) \circ \overline{\mathcal{F}(\nabla)}} \right) \quad (式 15)$$

其中, $\mathcal{F}$ 表示傅里叶变换, $\mathcal{F}^{-1}$ 表示傅里叶逆变换。

6、如权利要求 1 所述图像去模糊方法, 其特征是, 步骤 3) 采用 Richardson-Lucy 算法来实现所述非盲反卷积方法。

7、如权利要求 1 所述图像去模糊方法, 其特征是, 采用式 1 的卷积模型来拟合清晰图像的模糊过程:

$$I = L \otimes k + \eta \quad (式 1)$$

其中, I 表示模糊图像, k 表示模糊核, η 表示噪声。

8、如权利要求 7 所述图像去模糊方法, 其特征是, 所述噪声 η 的分布为高斯分布。

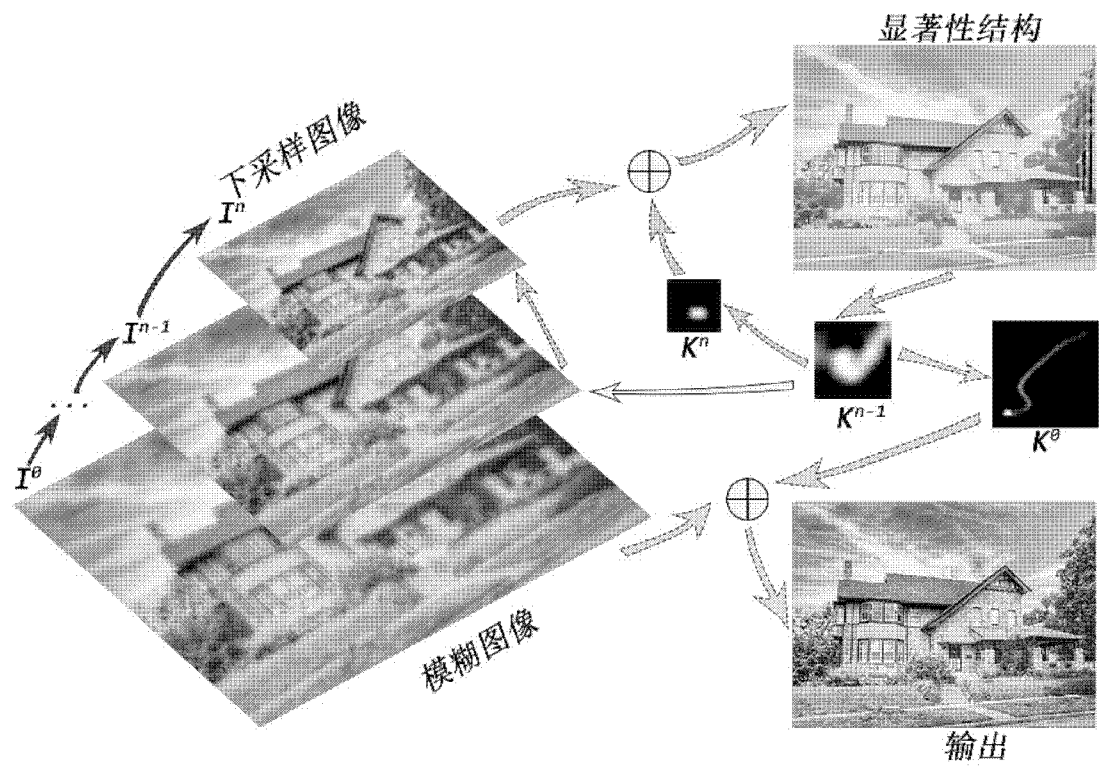


图 1

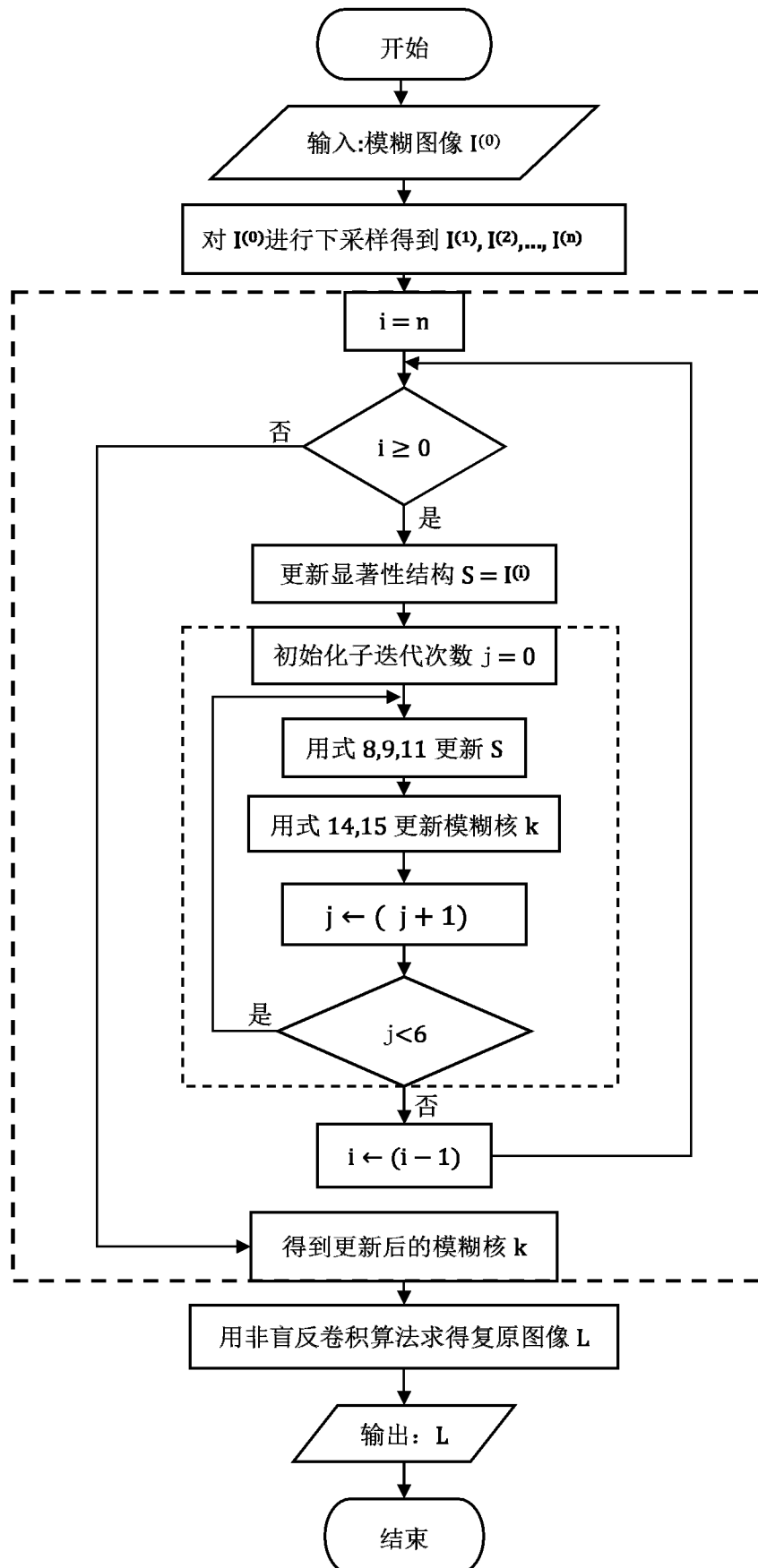


图 2

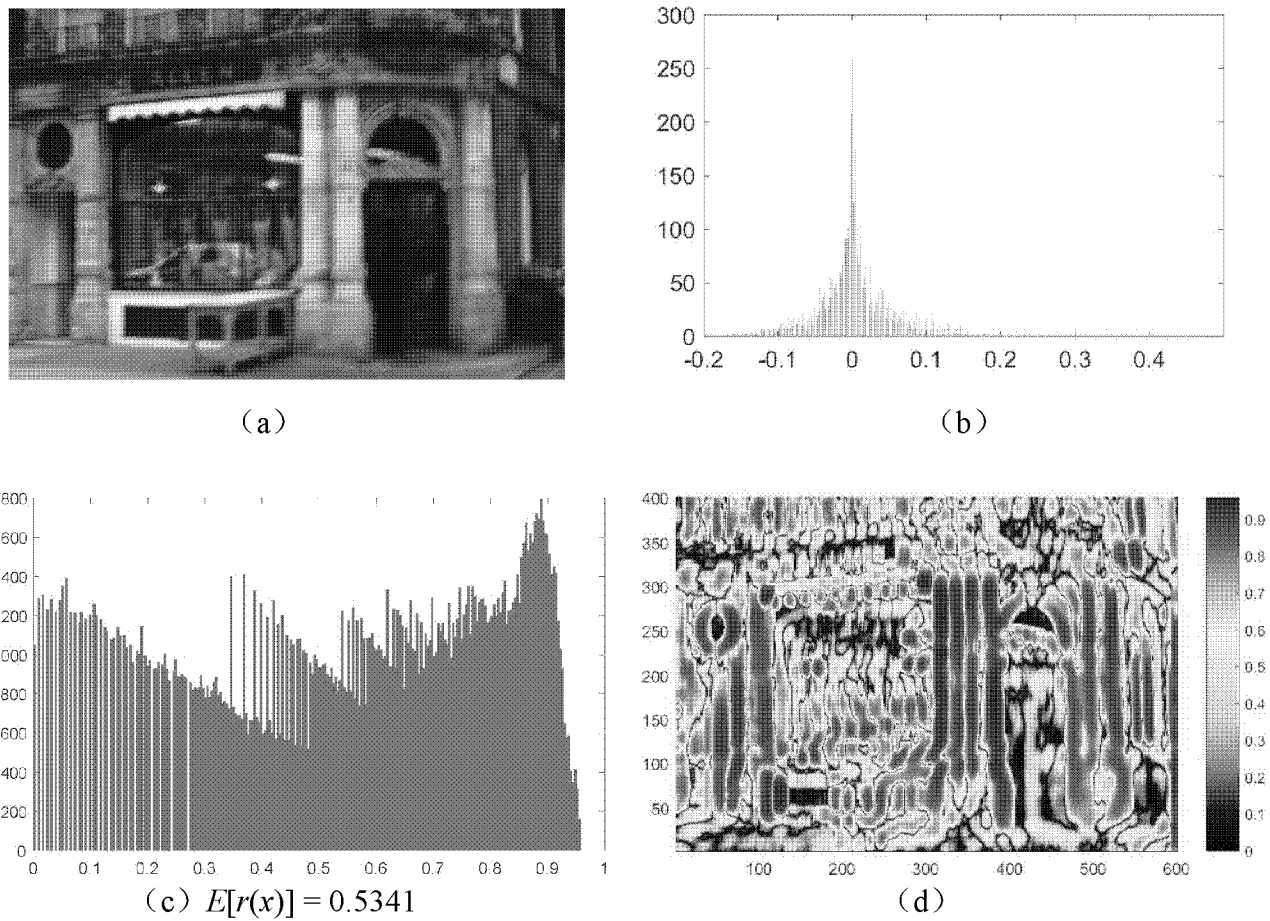


图 3

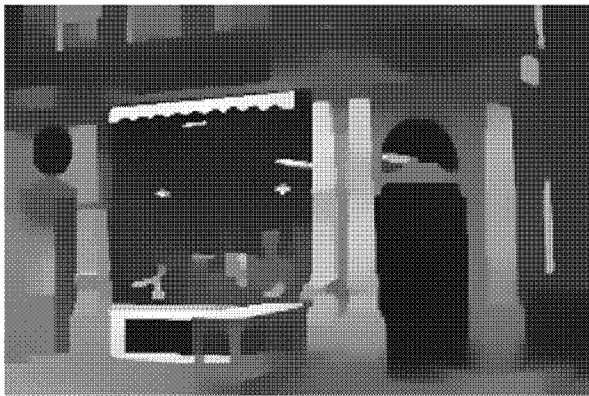


图 4

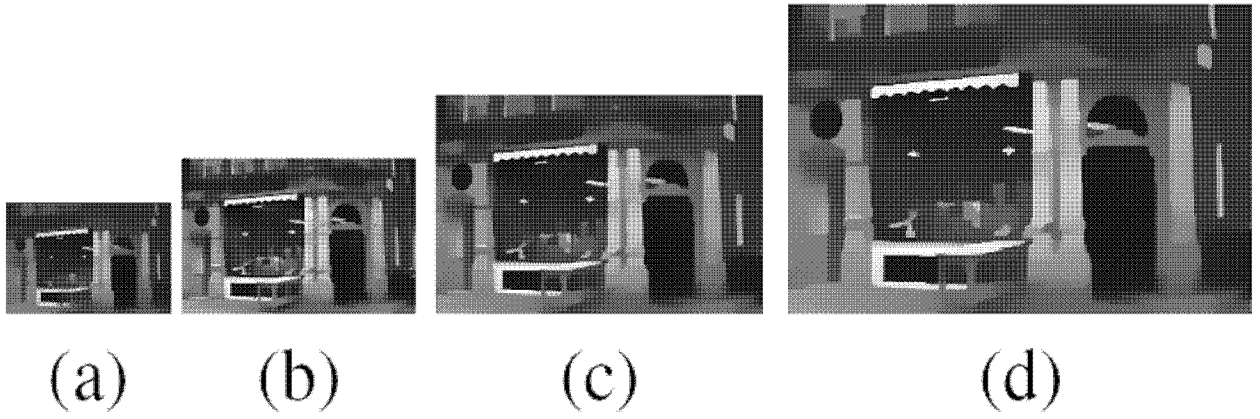


图 5

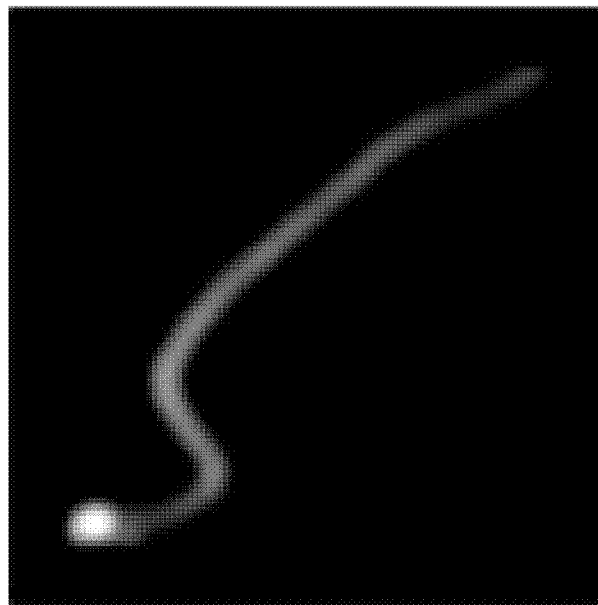


图 6

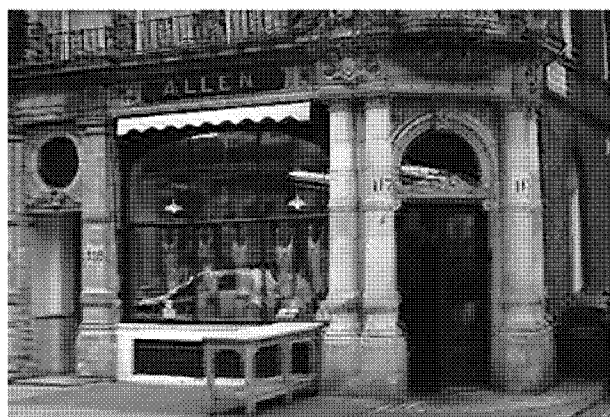


图 7



图 8

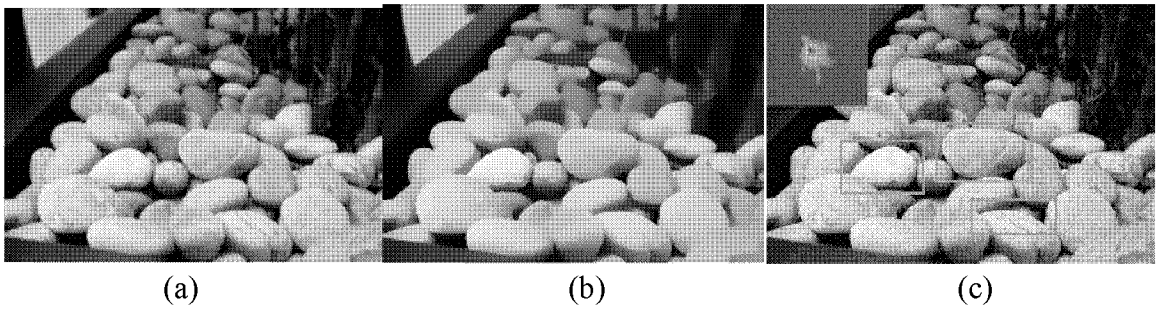


图 9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2017/111996

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06T 5/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06T,G09G,H04N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

Databases: CNABS, CNKI, DWPI, SIPOABS; key words: 图像, 去模糊, 先验, 卷积, 显著性, 模糊核, 非盲反卷积; image, deblur, prior, convolution, significance, blur kernel, non-blind deconvolution

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 107292842 A (PEKING UNIVERSITY SHENZHEN GRADUATE SCHOOL) 24 October 2017 (2017-10-24) entire document	1-8
A	CN 105894463 A (CHONGQING INFORMATION TECHNOLOGY DESIGNING CO., LTD.) 24 August 2016 (2016-08-24) entire document	1-8
A	CN 106709877 A (TIANJIN UNIVERSITY) 24 May 2017 (2017-05-24) entire document	1-8
A	US 2008025627 A1 (MASSACHUSETTS INST TECHNOLOGY ET AL.) 31 January 2008 (2008-01-31) entire document	1-8

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

30 January 2018

Date of mailing of the international search report

08 February 2018

Name and mailing address of the ISA/CN

State Intellectual Property Office of the P. R. China
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2017/111996

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	107292842	A	24 October 2017	None			
CN	105894463	A	24 August 2016	None			
CN	106709877	A	24 May 2017	None			
US	2008025627	A1	31 January 2008	US	7616826	B2	10 November 2009

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/111996

A. 主题的分类

G06T 5/00(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G06T, G09G, H04N

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

数据库: CNABS, CNKI, DWPI, SIPOABS; 关键词: 图像, 去模糊, 先验, 卷积, 显著性, 模糊核, 非盲反卷积; image, deblur, prior, convolution, significance, blur kernel, non-blind deconvolution

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 107292842 A (北京大学深圳研究生院) 2017年 10月 24日 (2017 - 10 - 24) 全文	1-8
A	CN 105894463 A (重庆信科设计有限公司) 2016年 8月 24日 (2016 - 08 - 24) 全文	1-8
A	CN 106709877 A (天津大学) 2017年 5月 24日 (2017 - 05 - 24) 全文	1-8
A	US 2008025627 A1 (MASSACHUSETTS INST TECHNOLOGY等) 2008年 1月 31日 (2008 - 01 - 31) 全文	1-8

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2018年 1月 30日

国际检索报告邮寄日期

2018年 2月 8日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

受权官员

徐蓉

传真号 (86-10)62019451

电话号码 (86-10)62089295

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2017/111996

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	107292842	A	2017年 10月 24日	无			
CN	105894463	A	2016年 8月 24日	无			
CN	106709877	A	2017年 5月 24日	无			
US	2008025627	A1	2008年 1月 31日	US	7616826	B2	2009年 11月 10日

表 PCT/ISA/210（同族专利附件）（2009年7月）