

基于变分的盲图像复原质量评价指标

成孝刚¹ 安明伟¹ 阮雅端¹ 陈启美¹

摘要 盲图像复原过程中, 图像质量评价至关重要. 通过分析重构图像质量与其总变分值之间的关系, 提出了用于图像复原的一种基于总变分 (Total bounded variation, TBV) 的图像质量评估方法, 并构建关系模型, 证明了原始清晰图像的总变分值在所有模糊图像中具有极大值, 且在所有重构图像的变分值中具有极小值. 通过分析, 得出结论: 当总变分取极值时, 基于所提度量方法, 可以获得更好的盲图像重构效果. 最后, 比较了原始清晰图像、模糊图像和重构图像之间的变分值, 计算机仿真验证了该方法的有效性和准确性.

关键词 总变分, 图像质量, 盲图像复原, 评价函数

引用格式 成孝刚, 安明伟, 阮雅端, 陈启美. 基于变分的盲图像复原质量评价指标. 自动化学报, 2013, 39(4): 418–423

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.00418

A Modern Image Quality Measurement Method for Blind Image Restoration

CHENG Xiao-Gang¹ AN Ming-Wei¹ RUAN Ya-Duan¹ CHEN Qi-Mei¹

Abstract In the process of blind image restoration, image quality assessment is of paramount importance. In this paper, A novel image quality assessment method is presented by analyzing the relation between reconstructed image quality and its total bounded variation (TBV), on this basis, the relationship model is constructed, that is, the original clear image's TBV is maximum in all the blurring image, and it is minimal in all the reconstructed image. Further, based on the metric method proposed, the better blind image reconstruction effect is obtained when the TBV is extremal. Finally, the TBV of original clear image, blurred images and blind restored images are compared, the simulation results shows the validation and veracity of the method proposed.

Key words Total bounded variation (TBV), image quality, blind image restoration, evaluation function

Citation Xiao-Gang Cheng, Ming-Wei An, Qi-Mei Chen, Ruan Ya-Duan. Novel image definition assessment index for image restoration. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(4): 418–423

在数字图像处理中, 盲图像复原技术广泛应用于各种实际问题. 在此过程中, 若能有效评价重构图像的质量, 可以使得复原图像的清晰度更佳^[1-2].

图像模糊分为散焦模糊和运动模糊两种. 学术界先后提出了不同的评价函数, 对去模糊图像的质量进行评价. 除了已使用多年的主观评价方法外, 并没有更加有效的评价准则. 然而主观评价方法速度较慢, 操作相对繁琐, 人工成本较高.

因此, 近年来, 客观图像质量评价方法逐渐成为研究热点. 主要分两大类: 一类基于数学定义, 诸如

均方误差、峰值信噪比、信噪比等. 第二类基于人眼视觉, 但效果欠佳. 在众多类型的数字图像系统中, 空间域方法简单而快速, 却不能灵敏的反映原始清晰图像的微小变化, 频域方法弥补了空间域方法的缺陷, 但其程序自动运行的计算速度却过于缓慢^[3].

Rudin 等将变分原理应用于图像恢复和盲卷积^[4], Blomgren 等拓展了变分理论^[5], 将其用于处理向量值. 基于上述基础, 本文研究了盲图像复原过程中, 一种基于总变分 (Total bounded variation, TBV) 的图像质量评估方法. 理论上说明了去模糊图像的质量与其总变分值之间的关系, 并阐述了原始清晰图像的变分值在所有模糊图像中具有极大值, 而在所有重构图像的变分值中具有极小值. 当总变分取极值时, 基于所提度量方法, 可以获得更好的盲图像重构效果. 最后, 文章比较了原始清晰图像、模糊图像和重构图像之间的变分值, 计算机仿真验证了该方法的有效性和准确性.

1 总变分

变分有界函数空间的定义为^[6,8]

收稿日期 2011-02-28 录用日期 2011-06-22
Manuscript received February 28, 2011; accepted June 22, 2011
国家科技重大专项 (2012ZX03005012, 2009ZX03003-007, 2011ZX03005-004-03) 资助
Supported by Fund of National Science and Technology Monumental Projects (2012ZX03005012, 2009ZX03003-007, 2011ZX03005-004-03)
本文责任编辑 刘一军
Recommended by Associate Editor LIU Yi-Jun
1. 南京大学电子科学与工程学院 南京 210093
1. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093
该文的英文版同时发表在 *Acta Automatica Sinica*, vol. 39, no. 4, pp. 418–423, 2013.

$$BV(\Omega) := \{u, \int_{\Omega} |Du| d\Omega < \infty\} \quad (1)$$

上式中, Du 表示 u 在分布意义上的导数. 由此, 可以得到有界变分函数的全变分定义, 即:

$$TBV(u) := \int_{\Omega} |\nabla u| dx \quad (2)$$

在盲图像复原中, 令 $f(x, y)$ 表示原始清晰图像的像素, 总有界变差为 $f(x, y)$ 在 x 和 y 方向变化速率绝对值的和. 则^[7]:

$$TBV_f = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\left| \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right| \right) dx dy \quad (3)$$

清晰图像 $f(x, y)$ 可因多种原因而模糊, 令为 $g(x, y)$

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + \eta(x, y) \quad (4)$$

上式中, $h(x, y)$ 为退化函数, 使得清晰图像 f 变模糊. $\eta(x, y)$ 表示噪声. 为了简化问题, 忽略噪声项. 则有:

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(u, v) h(x-u, y-v) du dv \quad (5)$$

$h(x, y)$ 有两个非常重要的约束项, 即:

$$h(x, y) \geq 0, \quad x, y \in \mathbf{R} \quad (6)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) dx dy = 1 \quad (7)$$

基于上述约束项, 使得模糊图像 g 比原始清晰图像 f 模糊, 因此模糊图像 g 的 TBV 可以表示为^[8-9]

$$TBV_g = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\left| \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial g(x, y)}{\partial y} \right| \right) dx dy \quad (8)$$

2 理论描述

为了准确度量盲图像复原的质量, 文章研究了上述总变分理论, 并构建了总变分值与图像质量之间的关系模型. 阐述了极值 TBV 可以作为重构图像质量评估的准则. 如式 (9) 和 (10) 所示, 原始清晰图像的总变分值远大于模糊图像的 TBV, 随着重构图像不断接近原始清晰图像, 其 TBV 逐渐变小,

且原始清晰图像的 TBV 在所有去模糊图像中具有最小值.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\left| \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial g(x, y)}{\partial y} \right| \right) dx dy \leq \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\left| \frac{\partial f(u, v)}{\partial u} \right| + \left| \frac{\partial f(u, v)}{\partial v} \right| \right) du dv \quad (9)$$

$$\int \int \left(\left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \right) dx dy = \min \quad (10)$$

计算机仿真中, 通过对比原始清晰图像、模糊图像以及重构图像的变分值, 验证了上述方法的有效性.

首先说明模糊图像 $g(x, y)$ 的 TBV 小于原始清晰图像 $f(x, y)$ 的 TBV.

式 (6) 和式 (7) 为 $h(x, y)$ 的两个约束, 于是有:

$$\frac{\partial g(x, y)}{\partial x} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial f(u, v)}{\partial u} h(x-u, y-v) du dv \quad (11)$$

$$\frac{\partial g(x, y)}{\partial y} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial f(u, v)}{\partial v} h(x-u, y-v) du dv \quad (12)$$

因此^[9-10]

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left| \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial g(x, y)}{\partial y} \right| \right\} dx dy = \\ & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial f(u, v)}{\partial u} h(x-u, y-v) dx dy \right| + \right. \\ & \left. \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial f(u, v)}{\partial v} h(x-u, y-v) du dv \right| \right\} dx dy \leq \\ & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\partial f(u, v)}{\partial u} \right| h(x-u, y-v) du dv + \right. \\ & \left. \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\partial f(u, v)}{\partial v} \right| h(x-u, y-v) du dv \right\} dx dy = \\ & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left(\left| \frac{\partial f(u, v)}{\partial u} \right| + \left| \frac{\partial f(u, v)}{\partial v} \right| \right) \times \right. \\ & \left. \left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x-u, y-v) dx dy \right) \right\} du dv = \\ & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left| \frac{\partial f(u, v)}{\partial u} \right| + \left| \frac{\partial f(u, v)}{\partial v} \right| \right\} du dv \end{aligned} \quad (13)$$

即 $TBV_g \leq TBV_f$, 即模糊图像的 TBV 小于清晰图像的 TBV, 如式 (9) 所示.

式 (10) 表明原始清晰图像的 TBV 在所有去模糊图像的 TBV 中最小, 下面对此进行说明.

对于运动模糊图像, 假设图像 $f(x, y)$ 进行平面运动, $x_0(t)$ 和 $y_0(t)$ 分别为 x 和 y 方向上运动的时变分量. 模糊图像 $g(x, y)$ 的傅立叶变换如下:

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v) \quad (14)$$

其中, 退化函数 $H(u, v)$ 表示为

$$H(u, v) = \int_0^T e^{-j2\pi(ux_0(t)+vy_0(t))} dt \quad (15)$$

其中, T 为运动模糊时间.

假设图像进行匀速直线运动, 速度指定为 $x_0(t) = at/T$, $y_0(t) = bt/T$, 于是退化函数变为

$$H(u, v) = \frac{T}{\pi(ua + vb)} \sin(\pi(ua + vb)) e^{-j\pi(ua + vb)} \quad (16)$$

对于运动模糊图像复原, 目标是通过模糊图像 $g(x, y)$ 估计出时变分量 $x_0(t)$, $y_0(t)$. 如果 $x_0(t)$ 和 $y_0(t)$ 已知, 那么可以估计退化函数. 于是可以得到原始清晰图像:

$$F(u, v) = \frac{G(u, v)}{H(u, v)} \quad (17)$$

为了说明式 (10), 假设退化函数 H 不能准确估计, 于是分析去模糊图像 F 的特征. 为了简便起见, 只讨论简单的情况. 事实上, 如果匀速运动的估计为 $\hat{x}_0(t) = ct/T$, $\hat{y}_0(t) = dt/T$, 那么有:

$$\hat{F}(u, v) = \frac{G(u, v)}{\hat{H}(u, v)} = \frac{F(u, v)H(u, v)}{\hat{H}(u, v)} = F(u, v) \frac{uc + vd \sin(\pi(ua + vb))}{ua + vb \sin(\pi uc + vd)} e^{-j\pi(u(a-c) + v(b-d))} \quad (18)$$

其中, \hat{F} 和 \hat{H} 分别是原始清晰图像和退化函数的估计量. 考虑更为简单的情况, 令 $b = d = 0$, 那么式 (18) 可以表示为

$$\hat{F}(u, v) = F(u, v) \frac{c \sin(\pi ua)}{a \sin(\pi uc)} e^{-j\pi(a-c)} \quad (19)$$

从上述的公式中不难看出, 当 $\hat{H}(u, v) = 1$ 时, $\hat{F}(u, v)$ 是 $F(u, v)$ 的平滑情况, 于是

$$\sum \sum (\hat{F}(u, v)(u^2 + v^2))^2 \leq \sum \sum (F(u, v)(u^2 + v^2))^2 \quad (20)$$

另外, 同样有:

$$\sum \sum (\hat{F}(u, v)(u^2 + v^2))^2 \geq \sum \sum (F(u, v)(u^2 + v^2))^2 \quad (21)$$

然而, 式 (20) 和式 (21) 并不总是正确的. 实际上, 在式 (17) 中, 令 $a = 2c$, 可得:

$$\hat{F}(u, v) = F(u, v) \cos(\pi uc) e^{-j\pi(a-c)} \quad (22)$$

在这种情况下,

$$\iint (\nabla^2 \hat{f})^2 dx dy = \iint (\nabla^2 f)^2 dx dy \quad (23)$$

由于 TBV 可用于反映信号的上下波动情况, 对于二维图像, 可以定义

$$\iint \left(\left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \right) dx dy = \min \quad (24)$$

考虑到计算等原因, 式 (24) 可以表示为

$$\iint \left(\left| \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right| + \left| \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right| \right)^2 dx dy = \min \quad (25)$$

进而根据傅立叶变换的帕塞瓦尔等式, 得:

$$\iint (F(u, v)(u^2 + v^2))^2 dx dy = \min \quad (26)$$

即作为真值, 原始清晰图像的 TBV 在所有去重构图像的 TBV 中最小.

3 仿真实验和讨论

为进一步验证所提基于变分的盲图像复原质量评估方法, 文章针对标准的数字图像用例进行计算机仿真. 图 1(a) 为原始清晰图像, 尺寸为 514×436 , 8 位/像素. 对图 1(a) 模糊化得到图 1(b) 和图 1(g), 对图 1(b) 复原得重构图像 1(c)~1(f), 对图 1(g) 去模糊得到图像 1(h)~1(k). 很多原因会导致图像模糊, 诸如网络传输、编解码等. 文中, 针对原始清晰图像采取运动模糊, 即通过运动模糊滤波器使图 1(a) 模糊, 模糊方向为 $5^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 55^\circ, 65^\circ, 75^\circ$ 等. 这意味着像素在不同方向上移动, 模糊尺度代表像素移动的距离. 通过调整模糊尺度和方向, 得到不同的模糊图像, 然后采用各种去模糊方法, 诸如正则滤波、维纳滤波等, 获得较为清晰的重构图像. 并对不同图像的 TBV 进行比较, 包括原始清晰图像、模糊图像和重构图像以验证上述 TBV 理论的有效性.

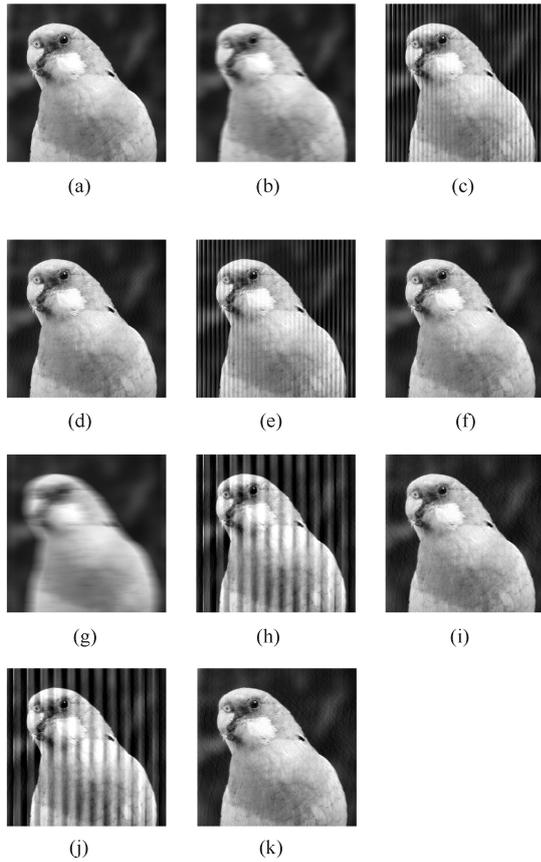


图1 清晰图像、模糊图像和复原图像清晰度的主观评价 (a) 清晰图像, TBV = 909 873; (b) 模糊图像: 10 像素, 0° , TBV = 512 525; (c) 正则滤波器, TBV = 2 335 141; (d) 正则滤波器, TBV = 1 677 299; (e) 维纳滤波器, TBV = 2 466 829; (f) 维纳滤波器, TBV = 1 793 396; (g) 模糊图像: 30 像素, 0° , TBV = 380 956; (h) 正则滤波器, TBV = 1 944 525; (i) 正则滤波器, TBV = 1 700 923; (j) 维纳滤波器, TBV = 1 987 353; (k) 维纳滤波器, TBV = 1 742 508)

Fig. 1 Subjective definition comparison of clear image, blurred image, and restored image ((a) Clear image, TBV = 909 873; (b) Blur image, 10 pixels and 0° , TBV = 512 525; (c) Regularized filter, TBV = 2 335 141; (d) Regularized filter, TBV = 1 677 299; (e) Wiener filter, TBV = 2 466 829; (f) Wiener filter, TBV = 1 793 396; (g) Blur image, 30 pixels and 0° , TBV = 380 956; (h) Regularized filter, TBV = 1 944 525; (i) Regularized filter, TBV = 1 700 923; (j) Wiener filter, TBV = 1 987 353; (k) Wiener filter, TBV = 1 742 508)

仿真说明了上述的 TBV 可以作为图像复原中图像清晰度的评价准则. 当去模糊图像的 TBV 取极值时, 得到所有去模糊图像中最为清晰的图像.

计算机实验中, 式 (3) 的离散形式表示为

$$D_f = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |f(x+1, y) - f(x, y)| +$$

$$|f(x, y+1) - f(x, y)| \quad (27)$$

图 2 为清晰图像和模糊图像 TBV 的对比. 对原始清晰图像在不同运动模糊方向上进行模糊, 如 5° , 15° , 25° , 35° , 45° , 55° , 65° , 75° 并以 10° 为间隔. 图 2 (a) 为 5° 和 25° 的 TBV 曲线, 虚线表示原始清晰图像的 TBV, 其值为 909 873. 当模糊程度为 5 像素时, 5° 曲线相应的 TBV 为 611 407; 25° 曲线相应的 TBV 为 599 185. 当模糊程度增加 5 个单位时, 5° 曲线相应的 TBV 分别为 494 791, 450 055, 419 975, 401 420, 381 274, 365 049, 350 147, 339 531, 329 465. 25° 模糊方向相应的 TBV 分别为 518 275, 471 188, 438 814, 413 286, 391 432, 373 500, 358 012, 345 054, 333 501. 图 2 (b)~2 (d) 与图 2 (a) 具有相同的特征. 因此, 如果模糊方向一定, 当模糊程度增加时, 图像将越来越模糊. 另外, 相应的 TBV 越来越小, 并且所有模糊图像的 TBV 均小于清晰图像. 这与式 (9) 一致.

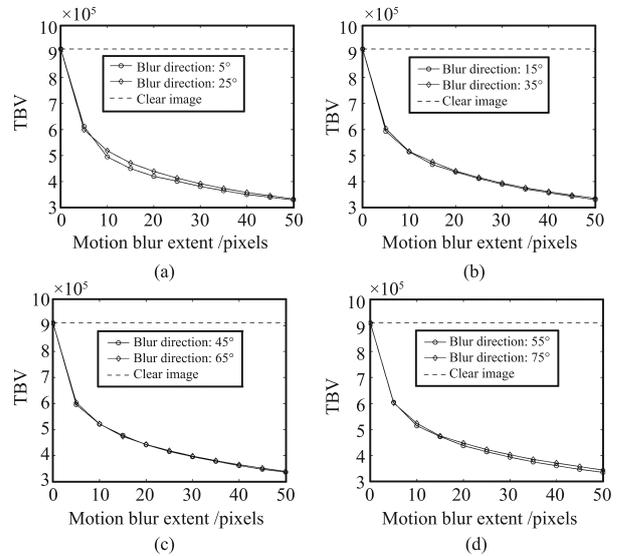


图2 原始清晰图像和模糊图像的 TBV, 通过对清晰图像不同程度和方向的模糊得到模糊图像 (a) 5° 和 25° ; (b) 15° 和 35° ; (c) 45° 和 65° ; (d) 55° 和 75°)

Fig. 2 TBV of clear image and blurred images (The blurred images are obtained by blurring the clear image with different blur direction and extent: (a) 5° and 25° ; (b) 15° and 35° ; (c) 45° and 65° ; (d) 55° and 75° .)

图 1 为原始清晰图像、模糊图像和去模糊图像的图像质量的主观比较. 根据退化函数 H , 通过运动模糊方法使原始清晰图像模糊 (图 1 (a), TBV = 909 873), 结果如图 1 (b) 和 1 (g) 所示, 相应的 TBV 分别为 515 525 和 380 956. 基于主观评价, 图 1 (g) 比图 1 (b) 模糊. 根据图 1 (a)、1 (b)、1 (g) 和图 2, 进一步验证了式 (9), 即在数字图像模糊的过程中,

图像越模糊, TBV 越小.

如图 1(c)~1(k) (除图 1(g) 外) 所示, 分别用正则滤波器和维纳滤波器复原模糊图像 (图 1(b) 和 1(g)). 如图 1(c) 由图 1(b) 应用正则滤波器进行去模糊. 在图 1(c) 和 (d) 中, 有条纹的去模糊图像, TBV 为 2 335 141, 另一个为 1 677 299. 图 1(e) 和 (f) 由图 1(b) 应用维纳滤波器进行去模糊的结果, 相应的 TBV 分别为 2 466 829 和 1 793 396. 图 1(g) 同样应用正则滤波器和维纳滤波器进行去模糊, 结果如图 1(h)~1(k) 所示, TBV 分别为 1 944 525, 1 700 923, 1 987 353 和 1 742 508. 因此, 当复原图像不断逼近真值时, TBV 渐渐减小.

图 3 显示了去模糊图像和原始清晰图像的

TBV. 令原始清晰图像为真值, 对于不同模糊尺度和方向的模糊图像, 应用多种去模糊方法进行重构, 本文给出了维纳滤波器和正则滤波器的方法. 接下来比较原始清晰图像和去模糊图像的 TBV. 图 3 中的虚线代表原始清晰图像的 TBV, 为 909 873, 即真值. 从图 1 和图 2 中可以看出, 所有给出的源于原始清晰图像的具有不同模糊尺度和方向的模糊图像均具有不同的模糊深度. 然而, 这并不影响对于本文提出理论的验证. 在图 3 中试图比较的是复原图像和原始清晰图像 TBV 的差异. 也就是原始清晰图像的 TBV 是否为所有复原图像中最小. 根据图 3(a)~3(h), 模糊方向分别为 5° , 15° , 25° , 35° , 45° , 55° , 65° , 75° .

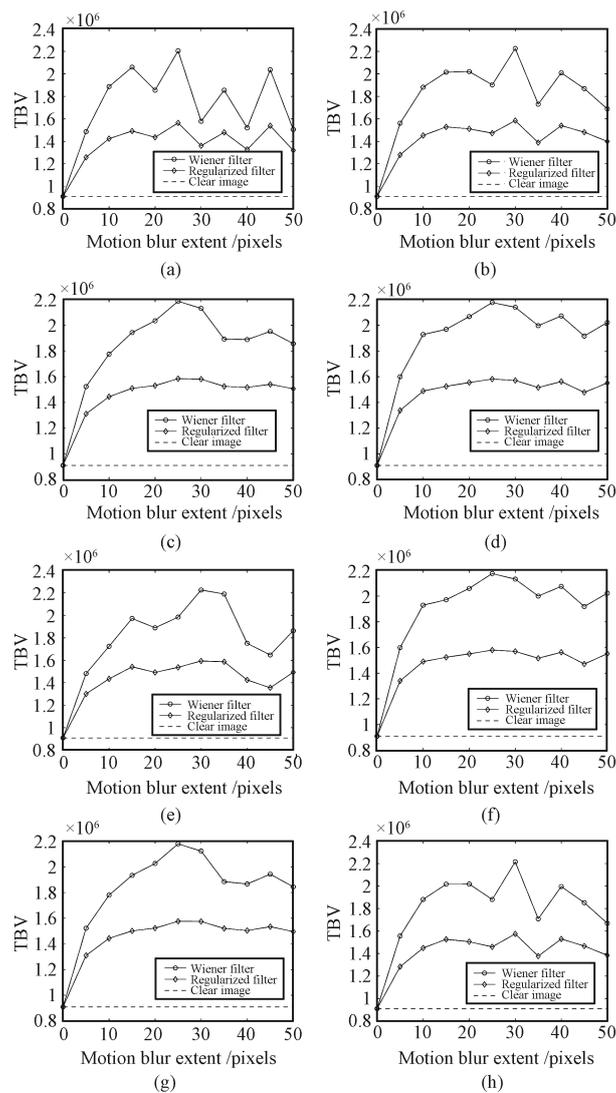


图 3 清晰图像和去模糊图像的 TBV 比较 (通过对清晰图像不同程度和方向的模糊得到模糊图像, 进而应用维纳滤波器和正则复原对模糊图像进行重构 ((a) 5° ; (b) 15° ; (c) 25° ; (d) 35° ; (e) 45° ; (f) 55° ; (g) 65° ; (h) 75°)

Fig. 3 TBV comparison between clear images and deblurred images (Blurring clear images with different blur images are obtained, then deblurring the blur images with wiener filter and regularized restoration: (a) 5° ; (b) 15° ; (c) 25° ; (d) 35° ; (e) 45° ; (f) 55° ; (g) 65° ; (h) 75° .)

从图 3 可以看出, 原始清晰图像的 TBV 显然是所有复原图像中最小的. 另外, 如图 2 所示, 对于模糊的图像, 模糊程度高, TBV 越小. 因此, 在图像复原中当 TBV 达到极值时, 相应的去模糊图像最为清晰, 即如式 (10) 和式 (11) 所示.

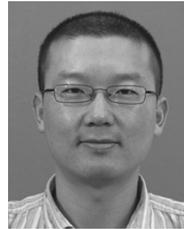
4 结语

在图像复原的过程中, TBV 可以作为图像质量的度量准则, 也就是说, 当 TBV 取极值时, 相应的去模糊图像最为清晰. 原始清晰图像的 TBV 在所有模糊图像中最大, 而在所有去模糊图像中最小. 当由于某些原因使原始清晰图像模糊化^[11-12], 如运动模糊, 模糊图像的 TBV 将会减小; 反之, 当模糊图像进行复原时, TBV 将会增大. 直观上同样易于理解的是, 当原始清晰图像进行模糊后, 图像边缘逐渐变得光滑, 相邻像素间的差异变小, 因此模糊图像的 TBV 较小. 同时在上述的图像复原过程中, 由于某些条件的限制, 应用现存方法通常难以对模糊图像进行准确复原^[13]. 在本文中, 提出了用于图像盲复原的一种新的图像质量评价指标, 即 TBV. 在图像复原的过程中, 如果去模糊图像的 TBV 达到最小, 得到的图像将最为清晰.

References

- 1 Liu X W, Huang L H. Split Bregman iteration algorithm for total bounded variation regularization based image deblurring. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2010, **372**(2): 486–495
- 2 Lieu L H, Vese L A. Image restoration and decomposition via bounded total variation and negative Hilbert-Sobolev spaces. *Applied Mathematics and Optimization*, 2008, **58**(2): 167–193
- 3 Kirova Y M, Pena P C, Hijal T, Fournier-Bidoz N, Laki F, Sigal-Zafrani B. Improving the definition of tumor bed boost with the use of surgical clips and image registration in breast cancer patients. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 2010, **78**(5): 1352–1355
- 4 Rudin L I, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms. *Physica D*, 1992, **60**(4): 259–268
- 5 Blomgren P V. Total variation method for restoration of vector valued images [Ph. D. dissertation], University of California, USA, 1998
- 6 Maleki M, Latifi M, Amani-Tehran M. Definition of structural features of nano coated webs by image processing methods. *International Journal of Nanotechnology*, 2009, **6**(12): 1131–1154
- 7 Quarello E, Trabbia A. High-definition flow combined with spatiotemporal image correlation in the diagnosis of fetal coarctation of the aorta. *Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*, 2009, **33**(3): 365–367
- 8 Cheng X G, An M W, Chen Q M. Image distortion metric based on total bounded variation. *China Communications*, 2012, **9**(2): 79–85

- 9 Cheng Xiao-Gang, Chen Qi-Mei, Liu Guo-Qing. The relation between total bounded variation and image definition detection. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2009, **32**(S1): 120–122, 139
(成孝刚, 陈启美, 刘国庆. 总有界变差与图像清晰度之间的关系. 北京邮电大学学报, 2007, **32**(S1): 120–122, 139)
- 10 Awwal A A S, Rice K, Taha T. Fast implementation of matched-filter-based automatic alignment image processing. *Optics and Laser Technology*, 2009, **41**(2): 193–197
- 11 Saad M A, Bovik A C, Charrier C. A DCT statistics-based blind image quality index. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, **17**(6): 583–586
- 12 Li Bo, Su Zhi-Xun, Liu Xiu-Ping. An adaptive PDE image processing method based on L_p norm. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(8): 849–853
(李波, 苏志勋, 刘秀平. 基于 L_p 范数的局部自适应偏微分方程图像恢复. 自动化学报, 2008, **34**(8): 849–853)
- 13 Moorthy A, Bovik A. Blind image quality assessment: from natural scene statistics to perceptual quality. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, **20**(12): 3350–3364



成孝刚 南京大学博士研究生. 主要研究方向为独立成分分析, 图像处理. 本文通信作者.

E-mail: xiaogangchan@163.com

(**CHENG Xiao-Gang** Ph.D. candidate at Nanjing University. His research interest covers independent component analysis and image processing.

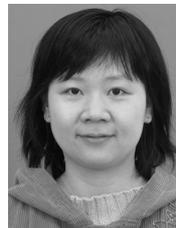
Corresponding author of this paper.)



安明伟 南京大学博士研究生. 主要研究方向为网络通信, 图像处理.

E-mail: amw7352@yahoo.com.cn

(**AN Ming-Wei** Ph.D. candidate at Nanjing university. His research interest covers network communication and image processing.)



阮雅端 南京大学电子与工程学院讲师, 博士生. 主要研究方向为视频图像处理.

E-mail: ruanyaduan@nju.edu.cn

(**RUAN Ya-Duan** Lecturer at the School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University. Her main research interest is image and video processing.)



陈启美 南京大学教授. 主要研究方向为计算机视觉, 网络通信.

E-mail: chenqimei@nju.edu.cn

(**CHEN Qi-Mei** Professor at Nanjing University. His research interest covers computer vision and network communications.)