



# 图像去模糊

章国锋



# 图像模糊的原因

# 图像模糊的原因

## ■ 相机抖动

- 拍摄时相机不稳
- 全部画面被模糊



# 图像模糊的原因

## ■ 相机抖动

- 拍摄时相机不稳
- 全部画面被模糊

## ■ 物体的运动

- 部分物体运动
- 不同区域模糊不同



# 图像模糊的原因

## ■ 相机抖动

- 拍摄时相机不稳
- 全部画面被模糊

## ■ 物体的运动

- 部分物体运动
- 不同区域模糊不同

## ■ 镜头失焦

- 大光圈小景深时的效果
- 深度不同模糊程度不同



# 图像模糊的原因

## ■ 相机抖动

- 拍摄时相机不稳
- 全部画面被模糊

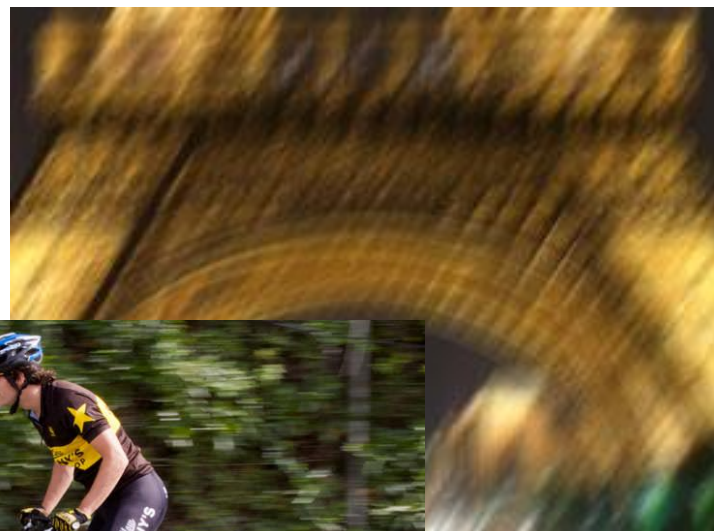
## ■ 物体的运动

- 部分物体运动
- 不同区域模糊不同

## ■ 镜头失焦

- 大光圈小景深时的效果
- 深度不同模糊程度不同

## ■ 其它 (poor lens, etc.)



# 图像去模糊

## ■ 利用硬件来去模糊

- 光学防抖
- 结合IMU等传感器信息
- 专业稳定设备
- 总而言之：贵！



Steadycam

# 图像去模糊

## ■ 利用硬件来去模糊

- 光学防抖
- 结合IMU等传感器信息
- 专业稳定设备
- 总而言之：贵！

## ■ 不修改硬件？

- 设计算法去模糊
- 计算摄影学所关心的



Steadycam



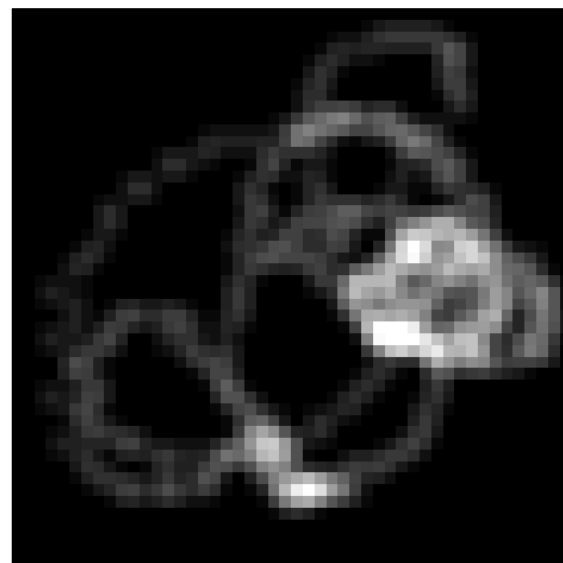
# 拍摄时发生了什么？



# 拍摄时发生了什么？



# 拍摄时发生了什么？



**相机的抖动**

# 模糊的卷积模型

- 假设场景是静态的，并进行针孔成像
  - 没有物体运动，没有失焦，只有抖动

# 模糊的卷积模型

- 假设场景是静态的，并进行针孔成像
  - 没有物体运动，没有失焦，只有抖动



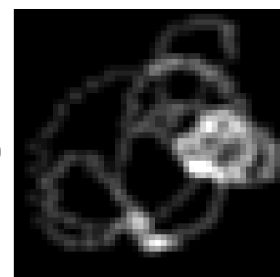
模糊图像  
(拍摄的)

=



清晰图像  
(要求解的)

$\otimes$



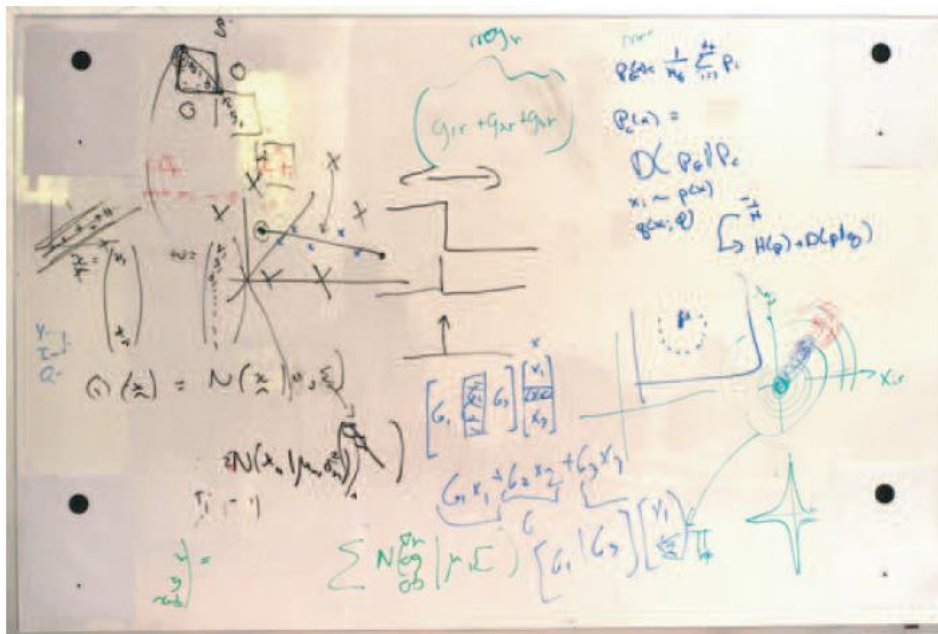
模糊核

卷积算子

# 模糊的卷积模型

- 假设场景是静态的，并进行针孔成像
  - 没有物体运动，没有失焦，只有抖动
- 模糊的图像是清晰的内容经过了卷积
  - 是这样么？

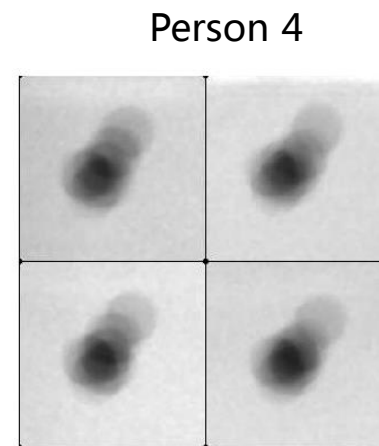
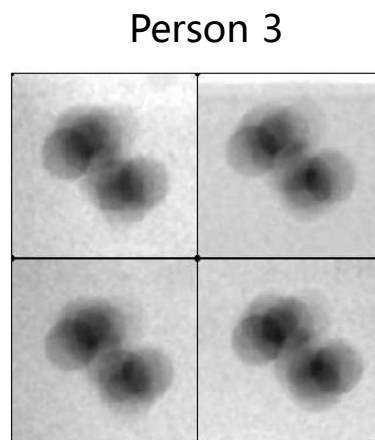
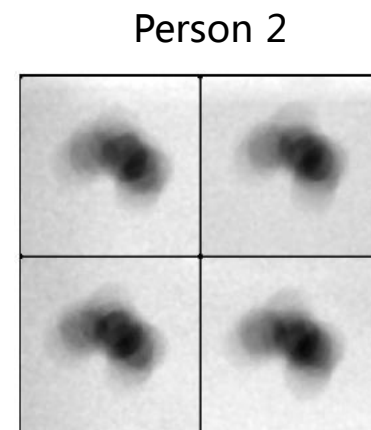
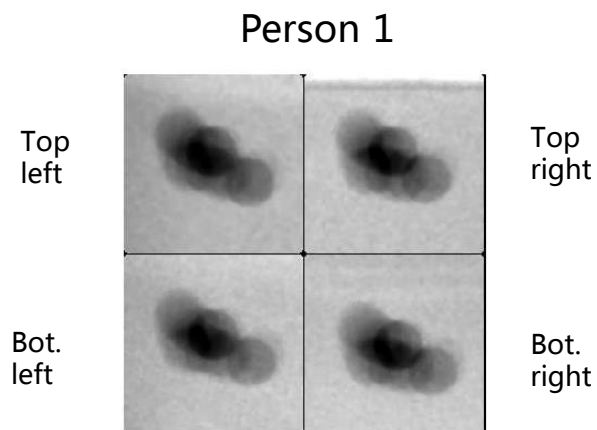
# 模糊的卷积模型



8个人，分别手持相机拍摄带有四个点标志的白板，曝光时间1秒钟

# 模糊的卷积模型

四个角模糊  
基本相同





# 模糊的卷积模型

- 假设场景是静态的，并进行针孔成像
  - 没有物体运动，没有失焦，只有抖动
- 模糊的图像是清晰的内容经过了卷积
  - 是这样么？
  - Approximately yes. (R. Fergus et al., 2006.)

# 模糊的卷积模型

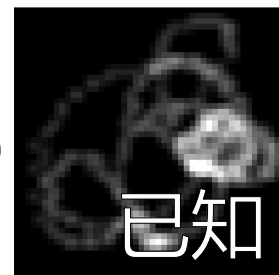
- 假设场景是静态的，并进行针孔成像
  - 没有物体运动，没有失焦，只有抖动
- 模糊的图像是清晰的内容经过了卷积
  - 是这样么？
  - Approximately yes. (R. Fergus et al., 2006.)
  - 求解卷积问题

# 解卷积——盲与非盲

- 非盲去卷积  
(Non-blind, NBID)



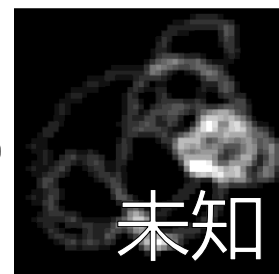
⊗



- 盲去卷积  
(Blind, BID)



⊗



# NBID

## ■ 是一个经典的问题

- Trott, T., “**The Effect of Motion of Resolution**”, *Photogrammetric Engineering*, Vol. 26, pp. 819-827, 1960.
- Slepian, D., “**Restoration of Photographs Blurred by Image Motion**”, *Bell System Tech.*, Vol. 46, No. 10, pp. 2353-2362, 1967.

The screenshot shows a Google Scholar search interface. The search bar contains the text "camera shake" and a "Search" button. To the right of the search bar are links for "Advanced Scholar Search", "Scholar Preferences", and "Scholar Help". Below the search bar, a green banner displays "Scholar All articles Recent articles" and "Results 1 - 10 of about 11,600 for camera shake. (0.07 seconds)". The number "11,600" is circled in red. On the left side, there is a list of "All Results" with links to "T Teramoto", "S Enomoto", "D Gray", "M Hamada", and "A Katayama". The main content area shows three search results, each with a title, authors, patent information, and a brief description. The first result is "Camera capable of correcting camera-shake - group of 2 »" by H Ootsuka, T Okada, H Masumoto, and M Hamada, with US Patent 5,561,485, 1996. The second result is "Camera-shake preventing device - group of 2 »" by K Imafuji and N Terui, with US Patent 5,337,098, 1994. The third result is "Camera shake correction system - group of 4 »" by A Misawa, K Ikari, and S Ueda, with US Patent 5,041,852, 1991.

Google Scholar BETA

camera shake Search

Advanced Scholar Search  
Scholar Preferences  
Scholar Help

Scholar All articles Recent articles Results 1 - 10 of about 11,600 for camera shake. (0.07 seconds)

Look up definition of sl

All Results

T Teramoto  
S Enomoto  
D Gray  
M Hamada  
A Katayama

**Camera capable of correcting camera-shake - group of 2 »**  
H Ootsuka, T Okada, H Masumoto, M Hamada - US Patent 5,561,485, 1996 - patentstorm.us  
Camera capable of correcting camera-shake - US Patent 5561485 from Patent Storm.  
A camera comprises an angular velocity sensor for detecting camera-shake. ...  
Cited by 26 - Related Articles - Cached - Web Search

**Camera-shake preventing device - group of 2 »**  
K Imafuji, N Terui - US Patent 5,337,098, 1994 - Google Patents  
... when it is detected that said bat -tery has been consumed beyond a predetermined amount, said control means starts compensation of the camera shake in response ...  
Cited by 22 - Related Articles - Web Search

**Camera shake correction system - group of 4 »**  
A Misawa, K Ikari, S Ueda... - US Patent 5,041,852, 1991 - Google Patents  
... Misawa et al. [il] Patent Number: [45] Date of Patent: [54] CAMERA SHAKE CORRECTION ...  
FIG. 27 PRIOR ART 7B Page 23. 5,041,852 CAMERA SHAKE CORRECTION SYSTEM ...

# NBID

## ■ 是一个经典的问题

- Trott, T., “**The Effect of Motion of Resolution**”, *Photogrammetric Engineering*, Vol. 26, pp. 819-827, 1960.
- Slepian, D., “**Restoration of Photographs Blurred by Image Motion**”, *Bell System Tech.*, Vol. 46, No. 10, pp. 2353-2362, 1967.

## ■ 多数基于简单的模型

- 频域解卷积
- 贝叶斯模型 (Richard, 1972. Lucy, 1974.)
- 对卷积核要求高

# NBID基本模型

■  $J = I \otimes K$

- J: 拍摄到的图像
- I: 需要求解的图像
- K: 卷积核

# 频域解卷积

- 空域的卷积 = 频域的乘积

- $FFT(J) = FFT(I \otimes K) = FFT(I) \times FFT(K)$

- 空域解卷积 = 频域的除法

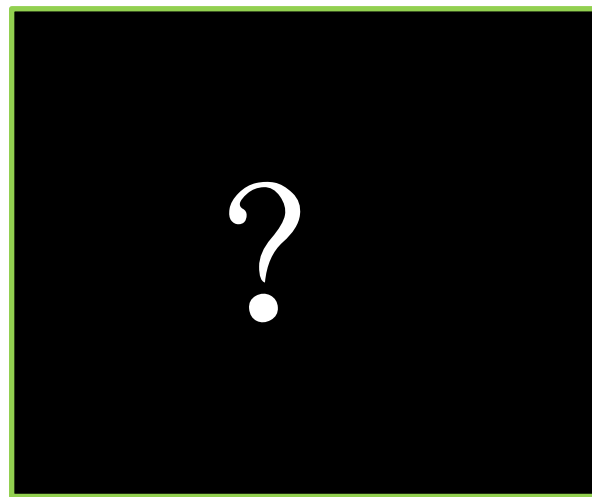
- $I = IFFT(FFT(J) \div FFT(K))$

# Richardson-Lucy

- 一种常用的空域迭代去卷积方法
  - 基于贝叶斯模型进行的最大似然估计



**Input**





# Richardson-Lucy

- 从边界概率公式

$$P(I_i) = \sum_k P(I_i|J_k)P(J_k)$$
$$P(J_k) = \sum_j P(J_k|I_j)P(I_j)$$

- 根据贝叶斯公式

$$P(I_i|J_k) = \frac{P(J_k|I_i)P(I_i)}{P(J_k)}$$

- 代入到  $P(I_i)$  的边界概率

# Richardson-Lucy

$$P(I_i) = \sum_k \frac{P(J_k | I_i) P(I_i) P(J_k)}{\sum_j P(J_k | I_j) P(I_j)}$$

- 已知卷积核  $K$ ，我们希望  $\max_I P(I_i)$ 
  - 最大似然估计
  - 左右都出现了  $I$
  - 迭代求解

# Richardson-Lucy

- 前面的概率关系可以直接转化成

$$I^{(n+1)} = I^{(n)} \left( \frac{J}{I^{(n)} \otimes K} \otimes \hat{K} \right)$$

- 直观解释

- 用当前估计的清晰图像进行卷积
- 与模糊图像比较得到差异 → 当前估计的误差
- 将误差补偿到估计图像

# Richardson-Lucy

## ■ 一种常用的空域迭代去卷积方法

- 基于贝叶斯模型进行的最大似然估计
- 缺点：噪音、Ringing Artifacts



**Input**



**Richardson-Lucy**

# NBID是个病态问题

- 解并不唯一

**Solution 1:**



**Solution 2:**



# NBID是个病态问题

- 解并不唯一
- 好的解要“自然”

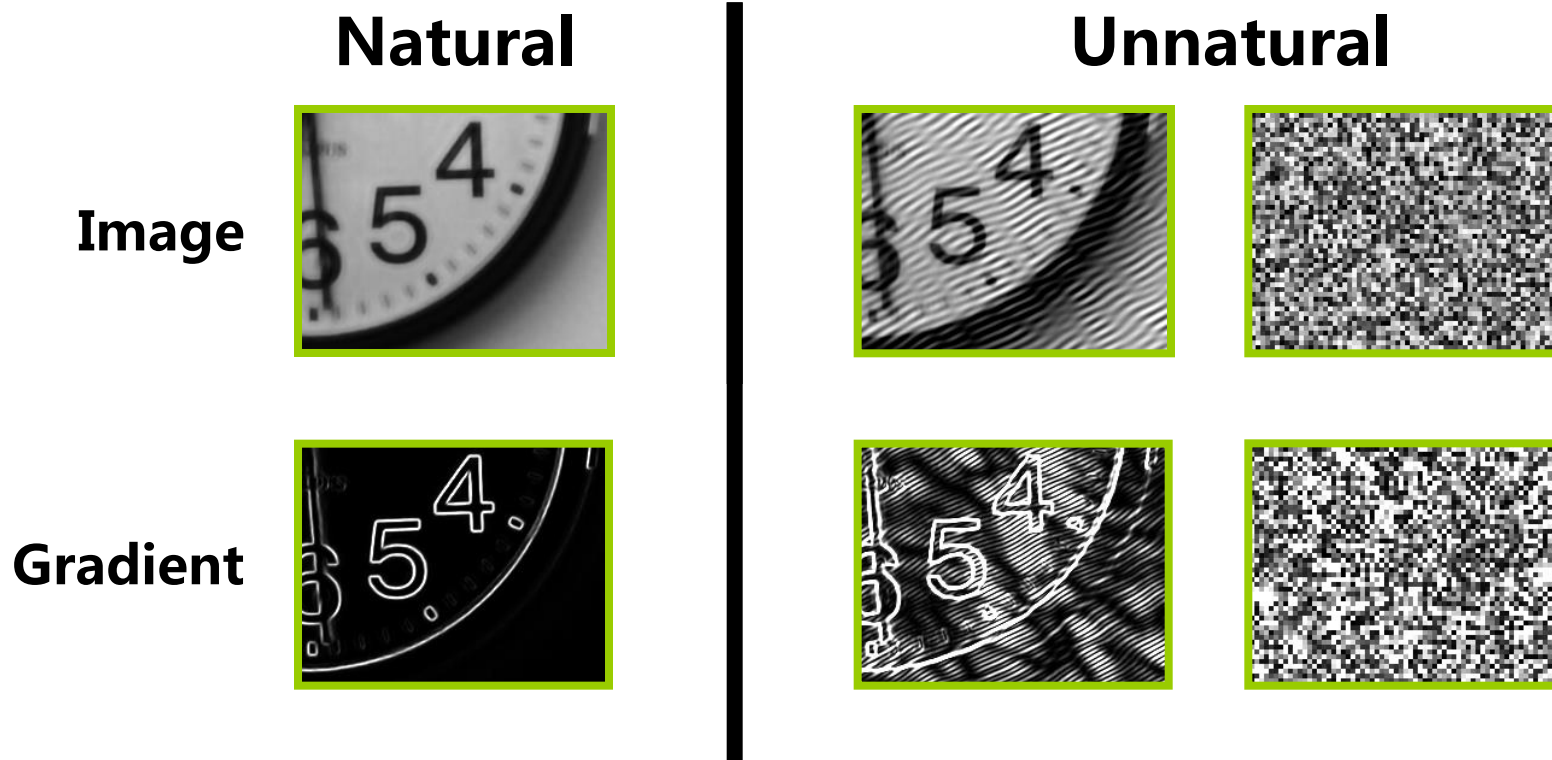
**Solution 1:**



**Solution 2:**



# 自然图片有什么特点？

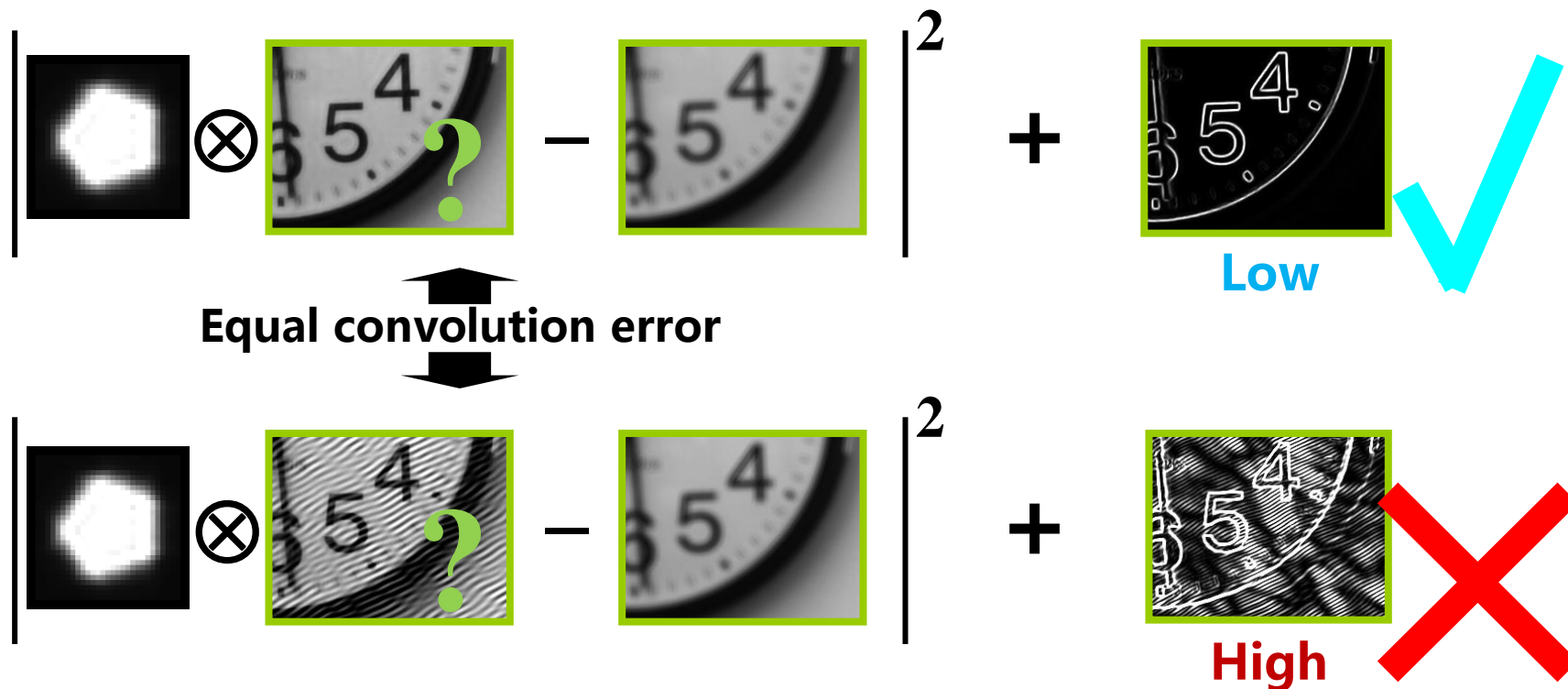


Natural images have sparse gradients

➡ put a penalty on gradients

# 带先验非盲去卷积

$$\min_I |K \otimes I - J|^2 + \lambda |\nabla I|^k$$





# R-L vs. Prior

$$\min_I |K \otimes I - J|^2 + \lambda |\nabla I|^k$$

$k=2$

“spread” gradients



Richardson-Lucy



Gaussian prior

$k=0.8$

“localizes” gradients



Sparse prior

# NBID的应用

## ■ 哈勃太空望远镜

- 升空时反射镜存在缺陷
- 最初使用去卷积方法消除问题



Image of star



# NBID的应用

## ■ 哈勃太空望远镜

- 升空时反射镜存在缺陷
- 最初使用去卷积方法消除问题

Before and after corrective optics



[http://en.wikipedia.org/wiki/Hubble\\_Space\\_Telescope](http://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_Space_Telescope)

# BID

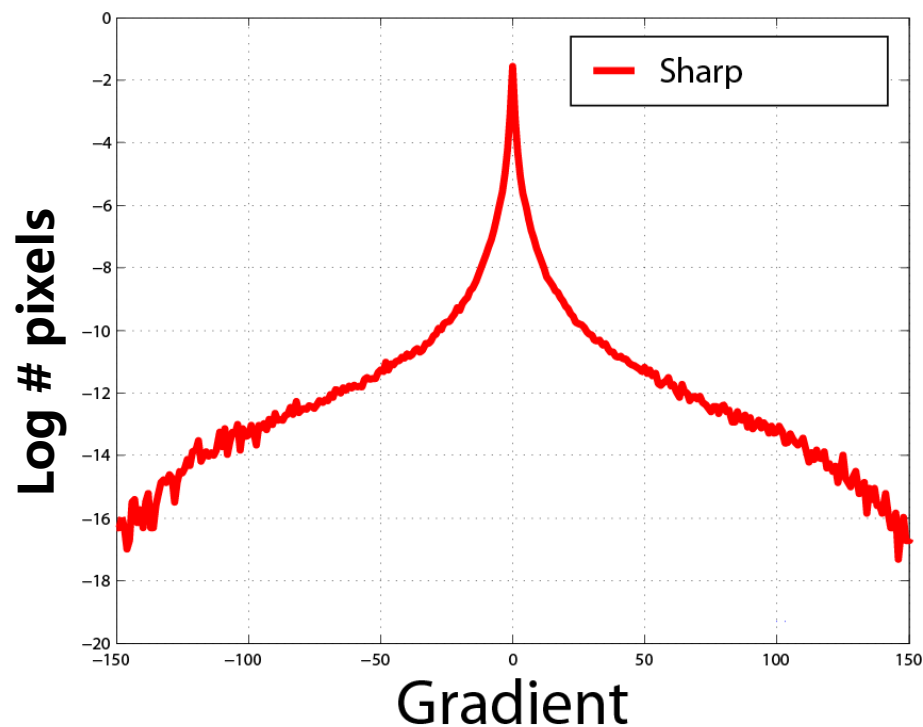
- 卷积核也未知
- 显然更加困难
  - 需要更多先验知识！

# BID

- 卷积核也未知
- 显然更加困难
  - 需要更多先验知识！
  - 自然图像的统计特征

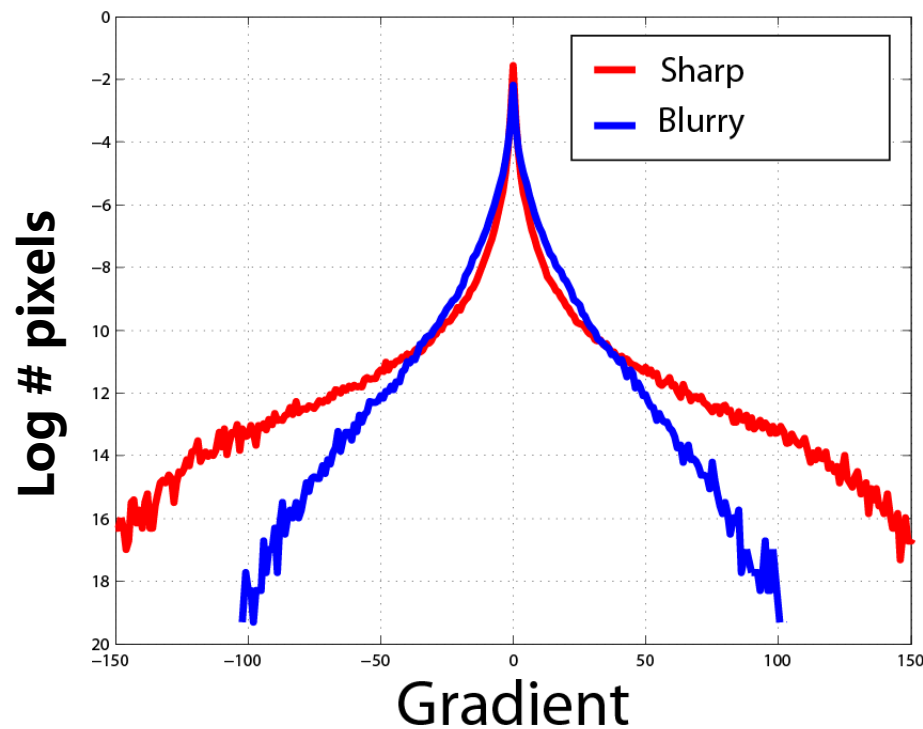
# 自然图像的统计特性

- 图像梯度的直方图具有明显的重尾分布 (Heavy-tail distribution)



# 模糊图像呢？

- 并不会出现重尾分布





# Removing Camera Shake from a Single Photograph

Rob Fergus, Barun Singh, Aaron Hertzmann,  
Sam T. Roweis and William T. Freeman

SIGGRAPH 2006

Massachusetts Institute of Technology  
and  
University of Toronto



# 哪些信息是已知的？

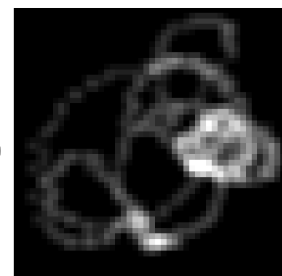
## ■ 图像的卷积模糊模型



=

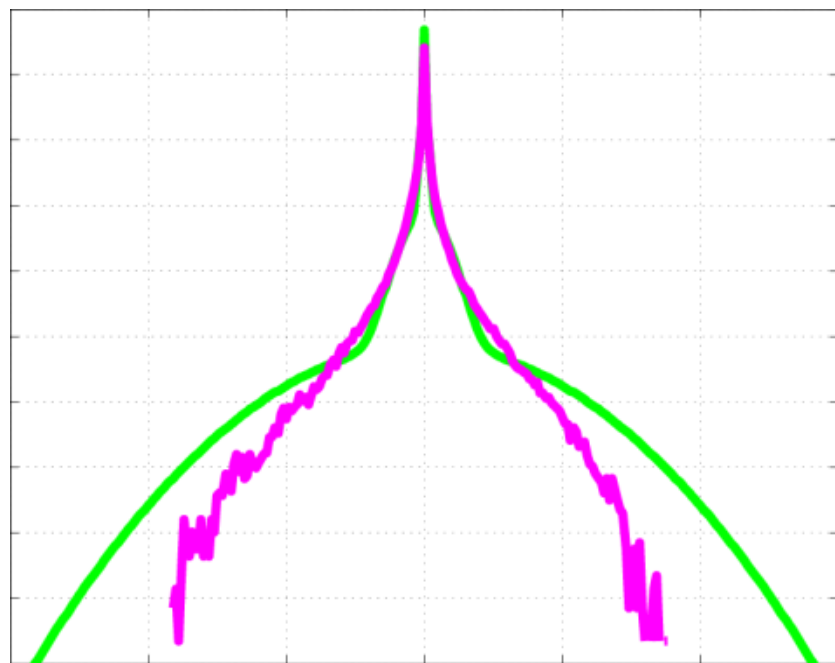


⊗



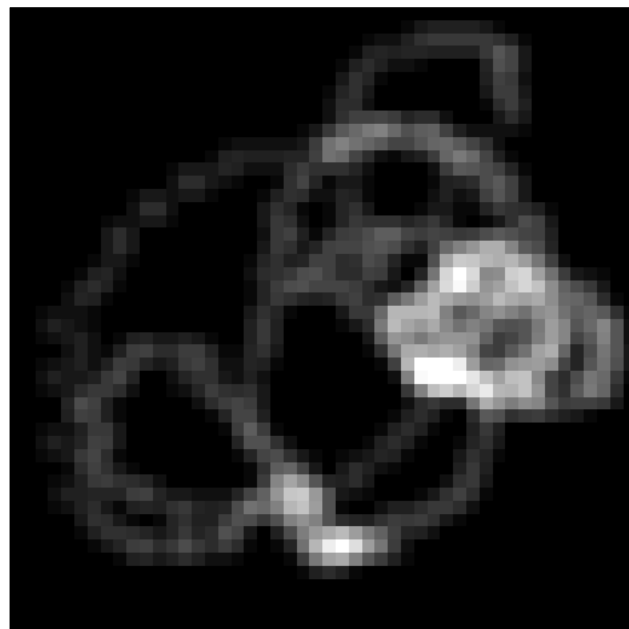
# 哪些信息是已知的？

- 图像的卷积模糊模型
- 图像梯度的先验信息
  - 重尾分布



# 哪些信息是已知的？

- 图像的卷积模糊模型
- 图像梯度的先验信息
  - 重尾分布
- 模糊核的先验信息
  - 非负且稀疏



# 概率模型

**X = 清晰图像    Y = 拍摄的模糊图像    K = 模糊核**

$$\mathbf{P(K, X | Y)} \sim \mathbf{P(Y | K, X) P(X) P(K)}$$

Posterior

1. Likelihood  
(Reconstruction  
constraint)

2. Image  
prior

3. Blur  
prior

# Likelihood $P(\mathbf{Y} \mid \mathbf{K}, \mathbf{X})$

- 对应了图像的卷积模型  $\mathbf{Y} = \mathbf{X} \otimes \mathbf{K} + \text{noise}$

$$P(\mathbf{Y} \mid \mathbf{K}, \mathbf{X}) = \prod_i \mathcal{N}(\mathbf{Y}_i \mid (\mathbf{K} \otimes \mathbf{X})_i, \sigma^2)$$

对所有  
像素值乘积

正态分布

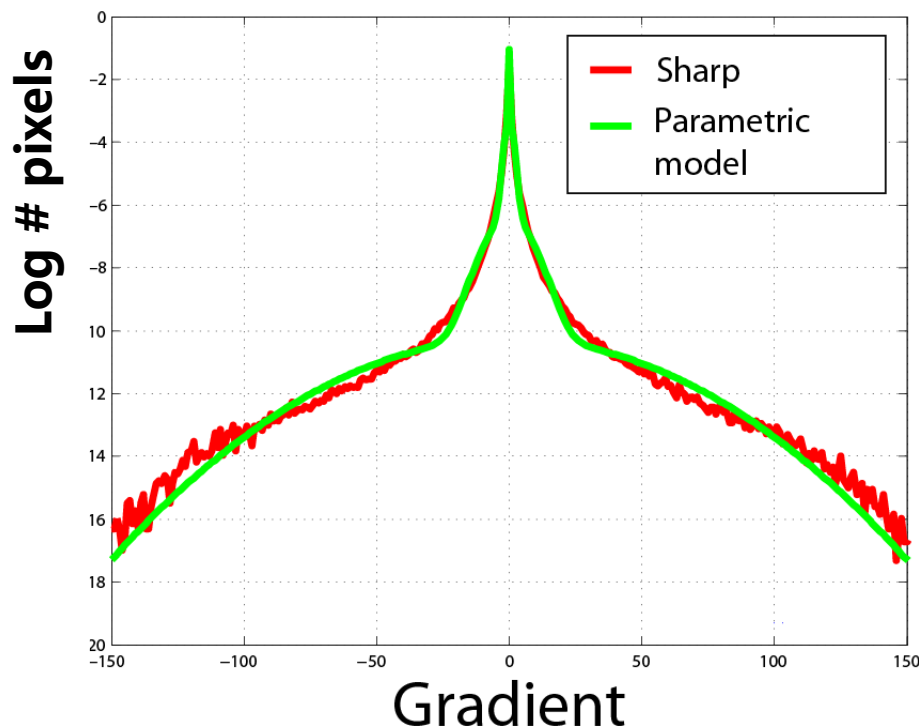
拍摄到的  
像素值

预期的  
像素值

噪音方差

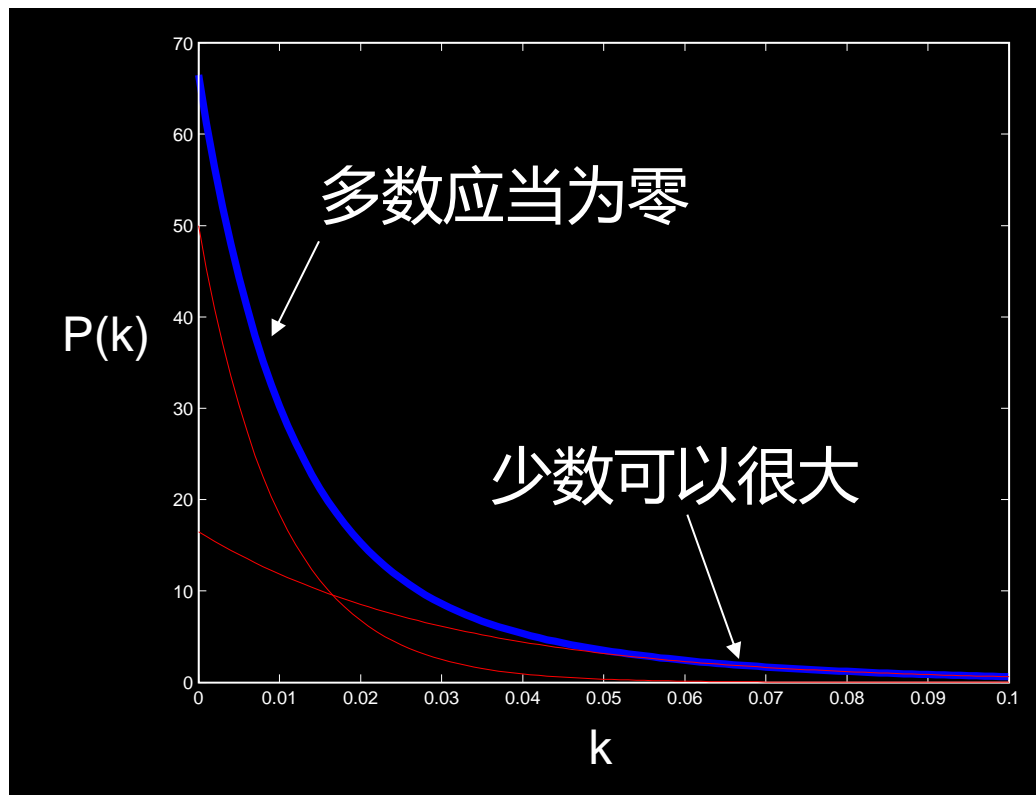
# Image Prior $P(X)$

- 使用从清晰图片得出的概率模型
  - 文中对所有输入使用了相同的高斯混合模型



# Blur Prior $P(K)$

- 非负且稀疏



# 联合优化求解

■ 求解  $K, X$  对应了最大后验估计 (MAP)

□ 实际中不可行

改为采用变分贝叶斯方法+多分辨率

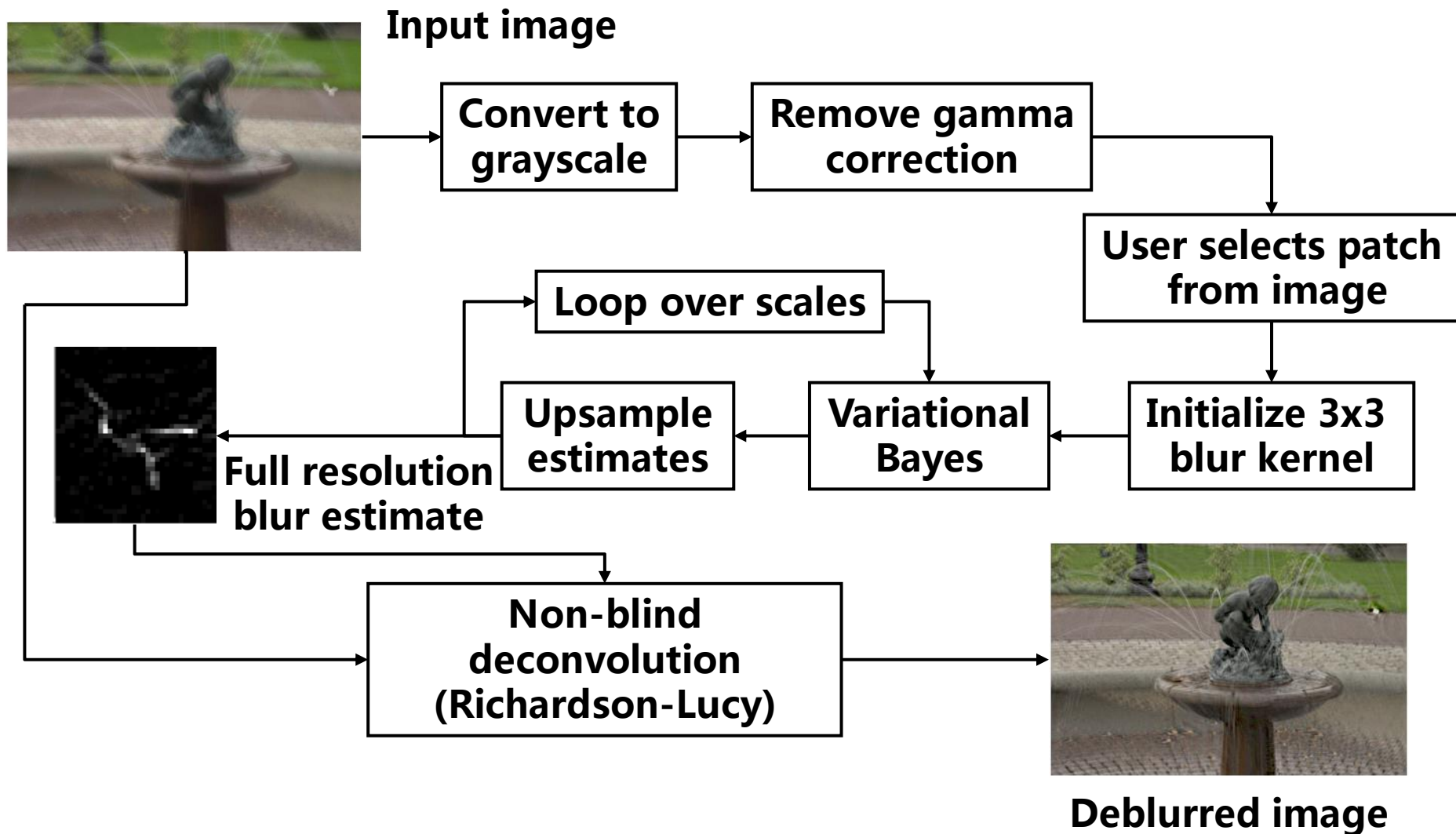
□ 详细参考论文

$X$  = 清晰图像     $Y$  = 拍摄的模糊图像     $K$  = 模糊核

$$P(K, X | Y) \sim P(Y | K, X) P(X) P(K)$$



# 算法框架



# 人造数据的结果

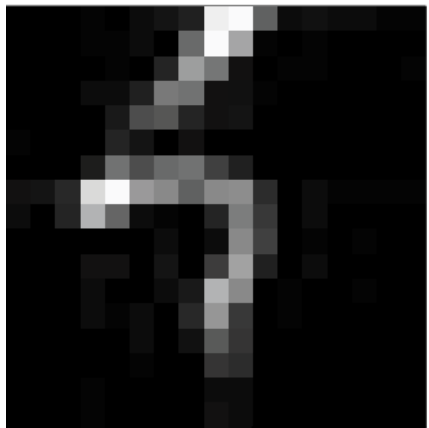
原始图片



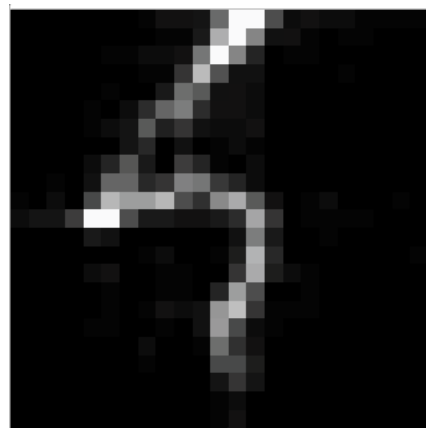
求解得到的图片



Ground-Truth 模糊核



求解出的模糊核



# Blurry image



# Matlab deconvblind



# Blurry image





# Deblurring output



# True sharp image





# 真实数据结果



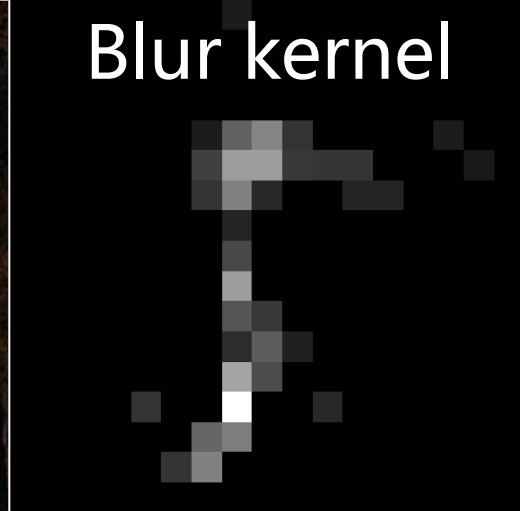
Original photograph



Output



Blur kernel

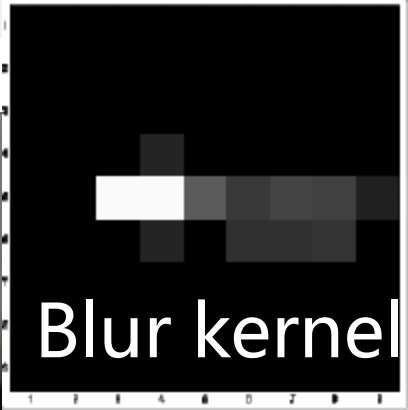




# Original photograph



Copyright © 2010 Pearson Education, Inc. All rights reserved. Printed in the United States of America. This publication is protected by copyright. Any unauthorized distribution or reproduction of this work is illegal. All rights reserved.



# 真实数据结果

## ■ 结果并不完美

- 相机类型等等并不知道，无法修正Gamma
- 噪音模型很单纯
- 最后的去卷积使用了简单的R-L
- .....

## ■ 启发了其后一大批的工作

# 小结

- 相机抖动模糊的模型是什么？
  - 图像卷积
- **BID**和**NBID**的区别是什么？
  - 卷积核是否已知
- 解卷积这种病态问题要如何处理？
  - 需要发现先验知识来约束解

# 运动模糊 vs. 相机抖动

- 相机抖动

- 全局一致的模糊

# 运动模糊 vs. 相机抖动

## ■ 相机抖动

- 全局一致的模糊

## ■ 运动模糊

- 不同物体  
模糊模式不同
- 分层处理，  
假定层内模糊一致  
(A. Levin, 2006)

Input & Segmentation



Deblurred image





# 运动模糊 vs. 相机抖动

- 相机抖动

- 通常是由于不良的拍摄条件导致



# 运动模糊 vs. 相机抖动

## ■ 相机抖动

- 通常是由于不良的拍摄条件导致
- 希望消除



# 运动模糊 vs. 相机抖动

## ■ 相机抖动

- 通常是由于不良的拍摄条件导致
- 希望消除

## ■ 运动模糊

- 有时是为了画面效果



# 运动模糊 vs. 相机抖动

## ■ 相机抖动

- 通常是由于不良的拍摄条件导致
- 希望消除

## ■ 运动模糊

- 有时是为了画面效果
- 不一定需要消除



# 镜头失焦

- 模糊核与深度有关

- 需要求解原始图像、深度、模糊核

- 假定模糊核关于深度的模型已知？

- Depth from focus/defocus

- 另一个研究领域（Depth from X）