

# Nonlinear Colorful Image Enhancement Based on Retinex\*

Xianchuan Yu<sup>#</sup>, Feng Ni, Dan Hu, Libao Zhang, Jindong Xu

College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing  
Email: <sup>#</sup>yuxianchuan@163.com

Received: Aug. 29<sup>th</sup>, 2012; revised: Sep. 5<sup>th</sup>, 2012; accepted: Sep. 15<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** To overcome the drawbacks of color distortion and losing details of multi-scale Retinex with color restoration, a nonlinear colorful image enhancement algorithm based on retinex is proposed. Firstly, the image is transformed from *RGB* color space to *YCbCr* color space, in order to avoid the defect of color distortion when it is processed directly in the *RGB* color space. Secondly, the image is locally adapted according to the modified Retinex model, which can retain the details well. Then, Gamma correction is used for global intensity control to compress dynamic range of the image. Finally, the result is transformed from *YCbCr* color space to *RGB* color space. Experiments show that our method has a good performance on either natural photo or remote sensing image, which reduces the color distortion, improves the visual appearance and enhances the detailed information.. Applying to remote sensing image classification, the result of the image processed in our method is more reliable and more accurate.

**Keywords:** Retinex; Hvs; Image Enhancement; Nonlinear Transform

## 一种基于 Retinex 的非线性彩色图像增强算法\*

余先川<sup>#</sup>, 倪锋, 胡丹, 张立保, 徐金东

北京师范大学信息科学与技术学院, 北京  
Email: <sup>#</sup>yuxianchuan@163.com

收稿日期: 2012年8月29日; 修回日期: 2012年9月5日; 录用日期: 2012年9月15日

**摘要:** 针对多尺度 Retinex 彩色恢复(MSRCR)算法容易造成颜色失真和丢失细节信息的缺点, 本文提出了一种基于 Retinex 的非线性彩色图像增强算法。首先将图像从 *RGB* 空间转换到 *YCbCr* 空间, 从而避免了直接在 *RGB* 空间进行处理时易造成颜色失真的缺陷, 然后采用改进的 Retinex 模型进行局部自适应增强, 很好地保留了图像的细节信息, 再利用 Gamma 校正做全局亮度调整, 对图像的整体动态范围进行压缩, 最后再将图像从 *YCbCr* 空间转换到 *RGB* 空间。实验结果表明, 算法对自然图像和遥感影像的处理结果都很有效, 没有出现颜色失真现象, 在改善视觉效果的同时也增强了图像的细节信息。

**关键词:** Retinex; HVS; 图像增强; 非线性变换

### 1. 引言

一个图像处理系统通常可以分为3个阶段, 分别是图像预处理阶段、特征抽取阶段和识别分析阶段。图像预处理阶段是非常重要的, 如果这阶段处理不

好, 后面的工作根本无法展开。图像增强是图像预处理中非常重要的一种方法。

Retinex 理论是由 Land<sup>[1,2]</sup>提出的一个关于人类视觉系统如何调节感知到物体的颜色和亮度的模型, 指出了图像色彩的恒常性, 也就是说同样的物体在不同的光源或光线底下颜色是恒定的。根据 Retinex 理论, 人眼中的图像的成像主要由两个因素决定, 分别为入

\*本文受国家自然科学基金(41072245, 41272359)、北京市自然科学基金(4102029)资助。

<sup>#</sup>通讯作者。

射光和反射物体,相应地一幅图像可以看成是由光照图像和反射图像两部分组成。在颜色恒定的条件下,就可以分别对光照图像和反射图像进行调整来达到图像增强的目的。Horn<sup>[3]</sup>指出光照可以用二维 Laplacien 加以估计。Hurlbert<sup>[4]</sup>从数学角度对 Retinex 理论进行了研究,并指出光照估计问题等价于泊松方程的求解。在此基础上,Jobson 等人<sup>[5-7]</sup>提出了单尺度 Retinex(SSR)、多尺度 Retinex(MSR)和多尺度 Retinex 彩色恢复(MSRCR)算法,用于增强图像的对比度。事实上,由于 SSR 和 MSR 等算法都假设光照在空间上是均匀分布的,这样就导致在高对比度边缘附近容易出现光晕现象;另外由于需要进行卷积运算,计算复杂性也较高。此后还有一些学者提出了一些改进算法,Kimmel 等人<sup>[8]</sup>提出了一种 Retinex 的变分表达式,Meylan 等人对在 Retinex 方法的基础上提出了一种自适应的高斯滤波方法<sup>[9]</sup>和一种全局处理和局部处理相结合的方法<sup>[10]</sup>,Bertalmio 等人<sup>[11]</sup>基于 Wilson-Cowan 等式提出了一种用于彩色视觉的 Retinex 算法,Morel 等人<sup>[12]</sup>指出如果路径是对称随机漫步的,那么仅通过两次快速傅立叶变换就可以实现经典的 Retinex 算法。

对彩色图像增强最简单的方法是直接对彩色图像的 R、G、B 三个分量进行处理,再将处理结果合成为彩色图像,但是由于三个分量增强的幅度不一致,很容易导致颜色失真。经典的 SSR 和 MSR 算法通常用于对灰度图像进行处理。MSRCR 算法直接对彩色图像的 R、G、B 三个分量进行处理,在处理完之后再行颜色恢复,但是其结果很大程度上依赖于参数的设定,若是参数设定得不好,往往会出现颜色失真的现象,同时会丢失一些细节信息。针对颜色失真的缺点,将空间变换的思想引入到基于 Retinex 的图像增强研究领域,有效地解决了这一问题。一个有效的空间变换应该具有如下三方面的特点:1) 具有可逆性;2) 较低的计算复杂性;3) 在变换后的空间中亮度是一个独立的分量。本文采用 RGB 空间到 YCbCr 空间的变换。本文提出的算法首先将图像从 RGB 空间转换到 YCbCr 空间,然后进行全局和局部两方面的调整,再将结果转换到 RGB 空间,从而实现了图像的增强。由于采用了空间变换的方法,从而避免了颜色的失真,同时在局部自适应增强的过程中对原有的

Retinex 照射反射模型进行了改进,采用了加权求和的形式,所以图像的细节信息也得到了很好的保留,实验结果也证实了提出方法的有效性。

## 2. Retinex 彩色图像增强

### 2.1. 空间变换

为了避免颜色失真,在 YCbCr 空间对图像进行增强。其中 Y 与 YUV 空间中的 Y 含义一致,代表亮度分量,Cb, Cr 同样都指色彩,只是在表示方法上不同而已。在空间变换之前,首先要对图像数据进行归一化的处理。图像的归一化处理可以将图像数据转换到一个预先设定的变化范围。设  $I(i, j, k)$  为图像像素点  $(i, j)$  第  $k$  通道的值,图像的大小为  $m \times n$ ,有 R、G、B 三个通道,图像数据中的最小值和最大值分别为  $\min(I)$  和  $\max(I)$ 。设  $N(i, j, k)$  为图像数据归一化处理后像素点  $(i, j)$  在第  $k$  通道的取值,设定的变化范围是  $[a, b]$ ,计算公式如下:

$$N(i, j, k) = \frac{(b-a)[I(i, j, k) - \min(I)]}{\max(I) - \min(I) + 1e-9} + a \quad (1)$$

由于出现了除法运算,一旦分母为 0,将导致程序无法正确运行。为了克服这个缺陷,可在分母加上一个极小的数以避免除零的情况发生,这里取的是  $1e-9$ 。

在归一化处理之后,可以进行空间变换。由 RGB 空间到 YCbCr 空间的转换公式如下:

$$\begin{cases} Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \\ Cb = -0.169R - 0.331G + 0.500B \\ Cr = 0.500R - 0.419G - 0.081B \end{cases} \quad (2)$$

而由 YCbCr 空间到 RGB 空间的转换公式如下:

$$\begin{cases} R = Y + 1.403Cr \\ G = Y - 0.344Cb - 0.714Cr \\ B = Y + 1.773Cb \end{cases} \quad (3)$$

其中, R、G、B 为彩色图像在 RGB 空间三个分量上的取值, Y、Cb、Cr 为对应的像素点在 YCbCr 空间三个分量上的取值。

### 2.2. 改进的 Retinex 照射反射模型

根据 Retinex 理论<sup>[1,2]</sup>,一幅图像  $Y(x, y)$  由照射分

量  $L(x, y)$  与反射分量  $R(x, y)$  两部分构成, 即:

$$Y(x, y) = L(x, y)R(x, y) \quad (4)$$

在对数域中可表示为:

$$\ln Y(x, y) = \ln L(x, y) + \ln R(x, y) \quad (5)$$

在经典的 Retinex 算法中, 通常是通过对  $Y(x, y)$  (数值范围为  $[0, 255]$ ) 进行高斯平滑来提取  $L(x, y)$ , 然后在对数域中通过对原图像和光照图像的比较来提取反射图像  $R(x, y)$ 。本文采用 Mean Shift 滤波进行光照估计, 该滤波算法可以有效地消除光晕现象。Mean Shift 算法是一种有效的统计迭代算法, 是由 Fukunage<sup>[13]</sup>在 1975 年首先提出的。Cheng<sup>[14]</sup>对 Mean Shift 算法进行了改进, 并将其应用于聚类 and 全局优化。Comaniciu<sup>[15]</sup>将该方法应用到图像特征空间的分析, 对图像进行平滑和分割处理, 并证明了其收敛性。图 1 所示是采用 Mean Shift 滤波对 Lena 图像进行光照估计的结果, 从图中可以看出该滤波算法很好地保持了图像的边缘结构。

在对数域中, 反射图像可以表示为(数据经过了归一化, 数值范围是  $[0, 1]$ ):

$$\ln R(x, y) = \ln Y(x, y) - \ln L(x, y) \quad (6)$$

对光照图像和原始图像进行加权求和所得到的

结果可以更好地保留原始图像中的细节信息, 因此对 Retinex 照射反射模型进行如下改进: 将增强后的亮度分量记为  $Y'(x, y)$ , 根据(6)则有,

$$\begin{aligned} Y'(x, y) &= \exp[k_1 \cdot \ln R(x, y) + k_2 \cdot \ln L(x, y)] \\ &= \exp[k_1 \cdot (\ln Y(x, y) - \ln L(x, y)) + k_2 \cdot \ln L(x, y)] \\ &= \exp[k_1 \cdot \ln Y(x, y) + (k_2 - k_1) \cdot \ln L(x, y)] \end{aligned}$$

最终在改进的 Retinex 照射反射模型中,  $Y'(x, y)$  可表示为: (令  $t_1 = k_1, t_2 = k_2 - k_1$ )

$$Y'(x, y) = \exp[t_1 \cdot \ln Y(x, y) + t_2 \cdot \ln L(x, y)] \quad (7)$$

### 3. 算法流程

本文提出的基于 Retinex 的非线性彩色图像增强算法主要包括如下四个步骤: 图像预处理、局部自适应增强、全局亮度调整和图像恢复。算法流程如图 2 所示:

具体的处理步骤如下:

1) 图像预处理主要包括两个部分: 归一化和空间转换。首先对图像数据进行归一化处理, 参见公式(1), 设定的变化范围是  $[0, 1]$ 。然后将数据从 RGB 空间变换到 YCbCr 空间, 变换方法如公式(2)所示, YCbCr 空间中的图像数据记为  $I$ 。



Figure 1. Filtered result by Mean Shift  
图 1. 基于 Mean Shift 的滤波

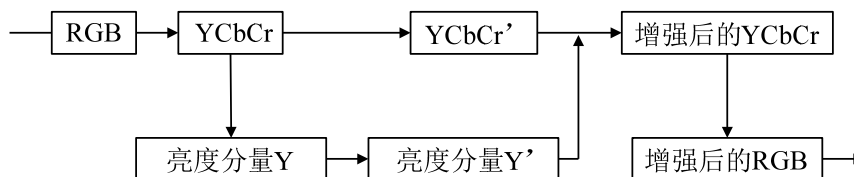


Figure 2. Flow chart of nonlinear colorful image enhancement based on Retinex  
图 2. 基于 Retinex 的非线性彩色图像增强算法的算法流程图

2) 局部自适应增强: 记  $I$  中的第一个分量即亮度分量为  $Y$ , 采用 Mean Shift 滤波进行光照估计, 光照图像记为  $L$ , 然后根据改进的 Retinex 照射反射模型中的公式(7)进行加权求和, 就得到了增强后的亮度分量  $Y'$ 。

3) 全局亮度调整: 利用 Gamma 校正对图像进行全局的调整, 提高图像的整体亮度<sup>[9]</sup>。调整的方法为

$$I' = I^{1/\gamma} \quad (8)$$

其中  $\frac{1}{\gamma} = \min\left(1, \frac{1}{6}Y_{avg} + \frac{2}{3}\right)$ , 当  $Y_{avg}$  大于 2 时,

不进行整体动态范围压缩;  $Y_{avg}$  越小,  $1/\gamma$  越小, 对黑暗区的有拉伸的效果, 这样可以保护细节, 避免图像失真。  $Y_{avg}$  在对数域中进行计算:

$$Y_{avg} = \frac{\sum_{1 \leq i \leq m} \sum_{1 \leq j \leq n} \ln Y(i, j)}{m \cdot n} \quad (9)$$

然后用步骤 2)中得到的亮度分量  $Y'$  替换掉  $I'$  中的亮度分量, 这样就得到增强后的图像。

4) 图像恢复与图像预处理相对应, 包括空间转换和归一化。将图像数据从  $YCbCr$  空间转换到  $RGB$  空

间, 变换的方法如下参见公式(3)。然后进行归一化, 归一化的计算方法参见公式(1), 设定的变化范围是  $[0,255]$ 。

## 4. 实验与分析

### 4.1. 图像增强的评价方法

对图像增强效果的评价主要有定性和定量两个方面。定性主要依靠图像的视觉效果进行评价, 具有主观性。而如何采用定量的方法对图像增强效果进行评价目前并没有统一的标准, 这里采用反映图像亮度的均值和反映图像细节信息的熵和清晰度作为统计参数, 对增强后的图像进行评价。

### 4.2. 自然图像的增强

使用 MSRCR 算法和本文算法分别对两幅自然图像进行处理(图像数据来自于 L. Meylan 的主页 <http://lcavwww.epfl.ch/alumni/meylan>), 记为自然图像 1 和自然图像 2, 图像大小均为  $360 \times 288$  像素, 实验结果分别如图 3 和图 4 所示, 图像的统计参数分别如表 1 和表 2 所示。



Figure 3. Experiment result comparison for image 1  
图 3. 自然图像 1 实验结果对比图



Figure 4. Experiment result comparison for image 2  
图 4. 自然图像 2 实验结果对比图

Table 1. Mean value, information entropy and image definition of image 1  
表 1. 自然图像 1 的均值, 信息熵和清晰度

	原图			MSRCR 算法增强图像			本文算法增强图像		
	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>
均值	41	43	34	154	146	123	66	67	55
信息熵	4.4	4.3	4.1	4.6	4.9	5.0	4.8	5.1	5.2
清晰度	4.6	4.6	4.6	5.7	5.5	5.1	6.1	6.1	7.1

Table 2. Mean value, information entropy and image definition of image 2  
表 2. 自然图像 2 的均值, 信息熵和清晰度

	原图			MSRCR 算法增强图像			本文算法增强图像		
	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>
均值	76	81	73	176	159	173	112	117	109
信息熵	4.9	5.0	4.8	4.8	5.0	4.6	5.0	5.1	4.9
清晰度	11.8	11.9	12.0	9.7	11.3	9.7	11.8	11.9	12.1

从数理统计(表 1)和目视判读(图 3)两方面分别对自然图像 1 实验结果进行分析和比较, 结论如下:

1) 从图 3 中可以看出, 原图的对比度偏低, 一些暗处的细节不明显。MSRCR 算法处理得到的结果与原图相比, 许多暗处的细节都凸现出来了, 但由于是直接 *RGB* 空间进行处理的, 所以颜色有些失真; 用本文的算法处理后, 图像的对比度得到了增强, 和 MSRCR 算法处理的结果相比, 颜色没有失真, 而且窗外天空中淡蓝色的云彩也得到了保留。

2) 从表 1 中可以看出, 原图的亮度偏低, 而 MSRCR 算法处理得到的图像的亮度偏高, 而用本文算法处理得到的图像的亮度介于两者之间, 视觉效果较好。信息熵值越大, 反映了图像携带的信息量越多; 清晰度值越大, 说明对应的图像越清晰。从表 1 中可以很明显地看出本文算法处理得到的图像的信息熵值和清晰度值最大, MSRCR 算法处理得到的图像次之, 原始图像的信息熵值和清晰度值最小, 这说明本文算法处理得到的图像的细节信息最为丰富。

从数理统计(表 2)和目视判读(图 4)两方面分别对自然图像 2 实验结果进行分析和比较, 结论如下:

1) 从图 4 中可以看出, 由于阴影的存在, 遮挡了

树的纹理和一部分草坪。MSRCR 算法处理得到的结果与原图相比, 许多暗处的细节都凸现出来了, 但是颜色出现了明显的失真, 而且天空中蓝色的云朵和白色云朵的界限也变得模糊了; 用本文的算法处理后, 图像的对比度得到了增强, 和 MSRCR 算法处理的结果相比, 颜色没有失真, 而且天空中云朵间的边缘信息也得到了很好的保留。

2) 从表 2 中可以看出, 原图的亮度偏低, 而 MSRCR 算法处理得到的图像的亮度偏高, 而用本文算法处理得到的图像的亮度介于两者之间, 视觉效果较好。信息熵值越大, 反映了图像携带的信息量越多; 清晰度值越大, 说明对应的图像越清晰。从表 2 中可以很明显地看出本文算法处理得到的图像的信息熵值和清晰度值都不低于原图, 而 MSRCR 算法处理得到的图像某些信息熵值和清晰度值会低于原图。

### 4.3. 遥感影像的增强

#### 3.3.1 遥感影像 1 实验与分析

遥感影像 1 采用的实验数据是 2004 年 11 月 10 日北京师范大学主校区 SPOT5 多光谱影像(B2, B3, B4 波段), 影像大小为 512×512 像素, 分辨率为 2.5



m(已处理), 该区域主要地物有操场、绿地和建筑物等地物, 采用提出的算法和 MSRCR 算法分别对实验影像进行增强处理, 结果如图 5 所示, 影像的统计参数如表 3 所示。

从遥感影像 1 实验结果的数理统计(表 3)和目视判读(图 5)可知:

1) 从图 5 中可以看出, 原图的对比度偏低, 一些暗处的细节不明显。MSRCR 算法处理得到的结果与原图相比, 对比度得到了增强, 但整体颜色偏绿; 由于本文算法中采用了空间变换的方法, 因此影像的对比度得到了增强的同时, 却没有出现颜色失真的现象。

2) 从表 3 中可以看出, 原图的亮度偏低, 而 MSRCR 算法处理得到的影像的亮度偏高, 而用本文算法处理得到的影像的亮度介于两者之间, 视觉效果较好。从表 3 中可以很明显地看出本文算法处理得到的影像的信息熵值和清晰度值最大, MSRCR 算法处理得到的影像次之, 原始影像的信息熵值和清晰度值最小, 这说明本文算法处理得到的影像的细节信息最为丰富。

### 3.3.2. 遥感影像 2 实验与分析

遥感影像 2 为北京颐和园北部 2004 年 11 月 10 日的 SPOT5 多光谱影像(B2, B3, B4 3 个波段), 影像大小为 512×512 像素, 分辨率是 10 m, 该区域主要有湖泊、绿地、建筑物等地物, 采用提出的算法和 MSRCR 算法分别对实验影像进行增强处理, 结果如图 6 所示, 影像的统计参数如表 4 所示。

从遥感影像 2 实验结果的数理统计(表 4)和目视判读(图 6)可知:

1) 从图 6 中可以看出, 原图的对比度偏低, 一些暗处的细节不明显。MSRCR 算法处理得到的结果整体颜色偏绿, 由于原图中本来绿色的部分就占了很大的比例, 结果导致图像丢失了许多边缘信息; 本文算法处理的结果增强了影像的对比度, 而且没有出现颜色失真的现象。

2) 从表 4 中可以看出, MSRCR 算法处理得到的影像中绿色亮度分量明显偏高, 导致图像偏绿。从表 4 中可以很明显地看出本文算法处理得到的影像的信息熵值和清晰度值最大, MSRCR 算法处理得到的影像次之, 原始影像的信息熵值和清晰度值最小, 这说



Figure 5. Experiment result comparison for remote sensing image 1  
图 5. 遥感影像 1 实验结果对比图

Table 3. Mean value, information entropy and image definition of remote sensing image 1  
表 3. 遥感影像 1 的均值, 信息熵和清晰度

	原图			MSRCR 算法增强影像			本文算法增强影像		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B
均值	72	68	66	126	151	132	94	89	87
信息熵	4.8	4.7	4.4	5.1	4.9	4.7	5.1	5.0	4.8
清晰度	16.6	14.7	11.8	17.3	16.8	12.7	18.1	16.1	13



Figure 6. Experiment result comparison for remote sensing image 2  
图 6. 遥感影像 2 实验结果对比图

Table 4. Mean value, information entropy and image definition of remote sensing image  
表 4. 遥感影像 2 的均值, 信息熵和清晰度

	原图			MSRCR 算法增强影像			本文算法增强影像		
	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>
均值	102	106	112	116	162	122	135	138	145
信息熵	4.4	4.8	4.1	4.9	5.0	5.0	5.0	5.1	4.8
清晰度度数量	21.1	21.3	18.7	21.2	16.1	18.7	21.2	21.3	18.9

明本文算法处理得到的影像的细节信息最为丰富。

## 5. 结论

本文提出一种基于 Retinex 的彩色图像增强算法, 首先采用空间变换的方法在 *YCbCr* 空间对图像进行处理, 从而有效地避免了颜色失真的现象, 另一方面在局部自适应增强的过程中采用加权求和的形式, 使得原始图像的细节信息得到了很好的保持。自然图像与遥感影像实验分析表明, 算法对自然图像和遥感影像的处理效果都很好, 既增强了细节信息, 也改善了视觉效果。自然与遥感影像的增强处理采用本文提出的算法是有效和可靠的。

## 参考文献 (References)

- [1] E. Land, J. McCann. Lightness and retinex theory. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(1): 1-11.
- [2] E. Land. Recent advances in Retinex theory and some implications for cortical computations: Color vision and the natural image. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1983, 80(16): 5163-5169.
- [3] B. K. P. Horn. Determining lightness from an image. *Computer Graphics and Image Processing*, 1974, 3: 277-299.
- [4] A. Hurlbert. Formal connections between lightness algorithms. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3: 1684-1692.
- [5] D. J. Jobson, Z. Rahman and G. A. Woodell. Properties and performance of a center/surround retinex. *IEEE Transactions on Image Process*, 1997, 6(3): 451-462.
- [6] Z. Rahman, D. J. Jobson and G. A. Woodell. Image enhancement, image quality, and noise. *Proceeding of SPIE*, 2005, 5907, Article ID: 59070N.
- [7] Z. U. Rahman, D. J. Jobson and G. A. Woodell. Retinex processing for automatic image enhancement. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 100-110.
- [8] R. Kimmel, M. Elad, D. Shaked, et al. A variational framework for retinex. *International Journal of Computer Vision*, 2003, 52(1): 7-23.
- [9] L. Meylan, S. Susstrunk. Color image enhancement using a Retinex-based adaptive filter. *CGIV*, 2004: 359-363.
- [10] L. Meylan, S. Susstrunk. High dynamic range image rendering with a Retinex-based adaptive filter. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(9): 2820-2830.
- [11] M. Bertalmio, J. D. Cowan. Implementing the Retinex algorithm with Wilson-Cowan equations. *Journal of Physiology, Paris (France)*, 2009, 103(1-2): 69-72.
- [12] J. M. Morel, A. B. Petro and C. Sbert. A PDE formalization of Retinex theory. *IEEE Transactions on Image Process*, 2010, 19(11): 2825-2837.
- [13] K. Fukunaga, L. D. Hostetler. The estimation of the gradient of a density function, with application in pattern recognition. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1975, 21: 32-40.
- [14] Y. Cheng. Mean shift, mode seeking, and clustering. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(8): 790-799.
- [15] D. Comaniciu, P. Meer. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(5): 603-619.