

# 一种夜视图象处理的新算法

沈嘉励 张宇 王秀坛

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘要** 增强是夜视图象处理的一种重要方法, 而直方图均衡是最经典的图象信息增强算法之一, 但将它直接应用于夜视图象处理有如下缺点: (1) 丢失原始图象的亮度信息; (2) 处理过程中有简并现象发生. 该文结合夜视图象的特点, 提出了一种保持亮度和克服简并的算法, 即采用不同灰度区间分别均衡, 并且采用设定最小灰度间隔和最大拉伸系数的均衡函数的方法, 从一定程度上克服了上述缺点.

**关键词** 图象增强 直方图均衡 灰度级

中图法分类号: TN911.73 TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)06-0479-05

## A New Algorithm for Low-Light-Level Image Processing

SHEN Jia-li, ZHANG Yu, WANG Xiu-tan

(Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** Enhancement is one of the important methods of Low-light-level image processing. The Histogram-equalization (HE), a traditional enhancement algorithm, has several drawbacks to process such images. (1) The brightness information will be lost during the process of HE. (2) Degeneracy will happen during the process. This paper presents an algorithm that can preserve brightness and gray levels, which may decrease the disadvantages of the traditional methods.

**Keywords** Image enhancement, Histogram equalization, Gray-level

## 0 引言

对低质量图象, 比如微米图象的处理, 图象增强是一种基本的方法. 所谓图象增强, 就是“用来提高图象的视觉效果的一门技术”<sup>[1]</sup>. 在图象增强算法中, 直方图均衡即是一种最常见的算法, 严格来讲, 直方图均衡是“对原图象重新标度, 使增强图象的直方图变为某种要求的形式”的一类算法的总称; 其中最常见的是将直方图修正为均匀分布的形式, 下面讨论的“直方图均衡”都特指这种均衡方法. 它基本是依据各灰度值在被处理图象中的出现频率(即直方图), 采用对与高频灰度对应的区域作灰度拉伸, 以达到增加亮度和对比度的目的. 但传统的直方图算法有以下缺陷<sup>[1,2]</sup>: (1) 不保留原始图象的亮度

信息, 其处理后的图象, 灰度呈近似均匀分布, 因而其平均亮度总是在灰度范围的中值附近; (2) 处理过程中会发生简并现象, 即一些低频灰度可能被合并, 总的灰度级将有所损失, 从而造成图象细节的丢失. 文献[2]提出的 BBHE (Brightness Preserving Bi-Histogram Equalization) 算法在一定程度上解决了亮度保持问题, 本文在 BBHE 的基础上, 结合微光图象的特点, 针对 256 级灰度图象提出了一种利用双直方图均衡以保持亮度和通过设定最小灰度间距以克服简并现象的算法.

## 1 传统的 HE 和 BBHE 算法

### 1.1 直方图均衡(HE)算法

定义数字图象  $X$  中各灰度值的概率是

$$p_k = \frac{n_k}{n}$$

其中,  $n_k$  是灰度为  $k$  的象素数;  $n$  为图象总象素数  
令

$$C(k) = \sum_{j=0}^k p_j \quad (1)$$

设均衡后的输出为  $Y$  (所有象素  $y$  集合), 则有

$$Y = f(X) \quad (2)$$

式中,  $f$  为  $G(y) = 256C[G(x)]$ ;  $G[\cdot]$  是求象素灰度的运算.

根据以上直方图均衡的过程, 不难推导出, 经直方图均衡处理的图象具有以下特点: (1) 图象的平均灰度在灰度范围的中值附近, 而与原始图象的平均灰度无关; (2) 处理中将出现灰度级合并的现象, 因而造成图象灰度分辨率的下降.

### 1.2 双直方图均衡(BBHE)算法<sup>[2]</sup>

首先, 将原始图象  $X$  以灰度均值  $G_m$  为门限, 分为两个子图  $X_1, X_2$ , 即

$$X_1 = \{x(i, j) \mid G(x) \leq G_m\}$$

$$X_2 = \{x(i, j) \mid G(x) > G_m\}$$

接着, 对两个子图分别统计直方图, 并分别在各自的均值两侧的灰度范围内作均衡

$$p_1(G_k) = \frac{n_1(k)}{n_1}, k = 0, 1, 2, \dots, m$$

$$C_1(k) = \sum_{k=0}^m p_1(k) \quad (3)$$

$$Y_1 = f_1(X_1), \text{ 其中, } f_1 \text{ 为 } G(y) = G_m C[G(x)].$$

$$p_2(G_k) = \frac{n_2(k)}{n_2}, k = m+1, m+2, \dots, L-1$$

$$C_2(k) = \sum_{k=m+1}^{L-1} p_2(k) \quad (4)$$

$$Y_2 = f_2(X_2)$$

其中,  $f_2$  为  $G(y) = G_m + (256 - G_m) C[G(x)]$

然后, 将处理后的子图合并:

$$Y = Y_1 \cup Y_2$$

子图的分割、处理、合并都是依照灰度进行的, 其象素的空间位置并不改变.

当假设原始图象直方图在均值两侧对称分布时, 输出图象的平均灰度为<sup>[2]</sup>

$$E(Y) = \frac{G_m + X_G}{2}$$

其中:  $X_G = \frac{L'+H'}{2}$ ,  $[L', H']$  为输出图象的灰度范围.

但 BBHE 仍然有灰度级合并的缺点, 且图象灰度均值仍有偏移.

## 2 保持灰度级和亮度的直方图均衡算法

该算法是首先推导出灰度级保持直方图均衡算法, 再引入 BBHE 的思想.

### 2.1 灰度级保持直方图均衡(GPHE)算法

在传统直方图均衡处理后, 原始图象中相邻灰度级在处理后的图象中的灰度间隔是  $\Delta G_k = p_k g'$  的取整, 其中,  $p_k$  是灰度为  $k$  的象素的出现概率;  $g'$  是处理后的图象灰度范围大小. 当  $p_k$  比较小时, 会出现  $\Delta G_k = 0$ , 即简并的现象. 根据克服简并的思路, 可以推导出灰度级保持算法的公式.

新算法应该至少满足两个要求: ① 当原始图象中灰度概率  $p_k$  比较小时, 算法应保持该灰度不与其它灰度合并; ② 当  $p_k$  较大时, 应拉开它与相邻灰度的距离, 以增强图象. 因此, 用新算法处理后图象的灰度间隔  $\Delta' G_k$  应包含以下两项: 其中一项当  $p_k$  比较小时, 起主要作用, 用以保持间隔; 另一项则当  $p_k$  比较大时起作用, 用于拉开灰度间隔. 下面是新算法的一种实现方案:

若新图象的灰度范围是  $g' (g' > g)$ , 则新图象中的灰度间隔为

$$\Delta G_k = 1 + p_k(g' - g) \quad (6)$$

设原始图象的灰度范围是  $[L, H]$ , 上式可展开写为

$$G'_{L+1} - G'_L = 1 + p_L(g' - g)$$

$$G'_{L+2} - G'_{L+1} = 1 + p_{L+1}(g' - g)$$

.....

$$G'_H - G'_{H-1} = 1 + p_{H-1}(g' - g) \quad (7)$$

将算式相加, 则得到 GPHE 的变换表达式

$$G'_j = L' + \sum_{k=L}^{j-1} [1 + p_k(g' - g)] \quad \text{设 } L' = G'_L \quad (8)$$

经 GPHE 变换的图象, 其灰度范围为  $[L', H']$ , 其平均灰度  $G'_m$  为

$$\begin{aligned} G'_m &= \sum_{j=L}^H G'_j + p_j \\ &= \sum_{j=L}^H \left[ L' + \sum_{k=L}^{j-1} [1 + p_k(g' - g)] \right] p_j \\ &= L' + \sum_{j=L}^H (j - L) p_j + (g' - g) \sum_{j=L}^H \sum_{k=L}^{j-1} p_k p_j \\ &= L' - L + G_m + \frac{g' - g}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= L' - L + G_m + \frac{(H' - L') - (H - L)}{2} \\
 &= \frac{L' + H'}{2} + \left| G_m - \frac{H + L}{2} \right| \quad (9)
 \end{aligned}$$

其中,  $G_m$  为原始图象平均灰度.

由此可见, 当原始图象的灰度分布比较对称, 或灰度分布范围很窄时, 输出图象的平均灰度  $G'_m$  是其灰度范围的中央, 即  $\frac{L' + H'}{2}$ .

### 2.2 保持亮度和灰度级的直方图均衡(GBPHE)

由于 GPHE 不具有保持亮度的效果, 而 BBHE 也不具备保持灰度级的功能, 但综合两种算法, 再引入限定拉伸系数(或者说限定输出灰度范围)的思想, 可以提出如下的 GBPHE 算法:

(1) 求出原始图象的平均灰度

$$G_m = \sum_{j=L}^H j p_j \quad (10)$$

(2) 将原始图象  $X$  以灰度均值  $G_m$  为界, 分为两个子图  $X_1, X_2$

$$X_1 = \{x(i, j) \mid G(x) \leq G_m\}$$

$$X_2 = \{x(i, j) \mid G(x) > G_m\}$$

两个子图的统计直方图分别为

$$p_1(k) = \frac{n_1(k)}{n_1}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

和

$$p_2(k) = \frac{n_2(k)}{n_2}, \quad k = m + 1, \dots, L - 1 \quad (12)$$

(3) 统计出各子图实际占用的灰度范围大小  $g_1$  和  $g_2$ .

(4) 两个子图分别在灰度区间  $[L', G_m]$  和  $[G_m, H']$  上进行 GPHE ( $L'$  和  $H'$  的确定方法将在稍后讨论), 设两个子图灰度区间的长度分别为  $g'_1$  和  $g'_2$ , 即

$$G' = \begin{cases} C_1(G) & G < G_m \\ C_2(G) & G > G_m \end{cases} \quad (13)$$

$$C_1(G) = L' + \sum_{j=0}^{G_m} [1 + p_1(j)(g'_1 - g_1)]$$

$$C_2(G) = G_m + \sum_{j=G_m}^{255} [1 + p_2(j)(g'_2 - g_2)]$$

### 2.3 GBPHE 算法分析

下面从平均灰度、灰度级数和噪声敏感性来对算法的处理效果进行分析.

(1) 平均灰度 设原始图象中两个子图中的象素占整幅图象象素比例为  $P_1$  和  $P_2$ , 则整幅图象的

平均灰度为

$$\begin{aligned}
 G'_m &= \sum_{j=0}^{255} G'_j p_j = \sum_{j=0}^{G_m-1} G'_j p_j + \sum_{j=G_m}^{255} G'_j p_j \\
 &= \sum_{j=0}^{G_m-1} G'_j p'_j P_1 + \sum_{j=G_m}^{255} G'_j p'_j P_2 \\
 &= G'_{m1} P_1 + G'_{m2} P_2 \quad (14)
 \end{aligned}$$

即整幅图象的平均灰度为两个子图灰度均值的加权平均.

设灰度的概率分布为  $p_k$ , 其仅在  $[L, H]$  范围有值, 而在其余区间为 0.

原始图象的灰度均值

$$G_m = \sum_{j=L}^H j p_j \quad (15)$$

由式(9)可得

子图  $X_1$  的平均灰度

$$G'_{m1} = \frac{L' + G_m}{2} + \left| G_{m1} - \frac{L + G_m}{2} \right| \quad (16)$$

子图  $X_2$  的平均灰度

$$G'_{m2} = \frac{G_m + H'}{2} + \left| G_{m2} - \frac{G_m + H}{2} \right| \quad (17)$$

子图  $X_1$  的象素比例

$$P_1 = \sum_{j=L}^{G_m} p_j \quad (18)$$

子图  $X_2$  的象素比例

$$P_2 = \sum_{j=G_m}^H p_j \quad (19)$$

将式(16)和式(17)代入式(14), 得到

$$\begin{aligned}
 G'_m &= \left| \frac{L' + G_m}{2} + \left| G_{m1} - \frac{L + G_m}{2} \right| \right| P_1 + \\
 &\quad \left| \frac{G_m + H'}{2} + \left| G_{m2} - \frac{G_m + H}{2} \right| \right| P_2 \\
 &= G_{m1} P_1 + G_{m2} P_2 + \frac{1}{2} [(L' - L) P_1 + \\
 &\quad (H' - H) P_2] \\
 &= G_m + \frac{1}{2} [(L' - L) P_1 + (H' - H) P_2] \quad (20)
 \end{aligned}$$

由此可见, 处理后图象的平均亮度即是原始图象的灰度均值附加一个偏移量, 即

$$\frac{B}{2} = \frac{1}{2} [(L' - L) P_1 + (H' - H) P_2] \quad (21)$$

当  $B = 0$  时, GBPHE 可以保持图象灰度均值不变. 而且由  $B = 0$ , 可推出

$$(L - L') P_1 = (H' - H) P_2 \quad (22)$$

即各子图的拓展范围和其子图比例成反比.

上式是一个包含两个未知数的不定方程,可以通过该方程确定  $L'$  及  $H'$  的选择方法,从而完全确定 GBPHE 的变换算式,下面出一种确定  $L'$  及  $H'$  的选择方案.

① 预设一个拉伸系数  $e$ .

② 由  $e$  初步确定处理后图象灰度范围下限  $L_p$

$$L_p = \max(G_m - e(G_m - L), 0) \quad (23)$$

③ 由式(22)初步推导出灰度范围上限

$$H_p = H + \frac{P_1}{P_2}(L - L_p) \quad (24)$$

④ 如果  $H_p \leq 255$ , 则确定  $L' = L_p, H' = H_p$ .

⑤ 如果  $H_p > 255$ , 则

$$H' = 255, L' = L - \frac{P_2}{P_1}(H' - H) \quad (25)$$

此时,  $L' > L - \frac{P_2}{P_1}(H_p - H) = L_p \geq 0$ .

需要指出的是,保持图象的平均灰度与增强图象并不矛盾,因为相对图象的平均亮度而言,人眼对图象的对比度更加敏感,GBPHE 在保持平均灰度的情况下,增大了图象的对比度,达到了增强的目的.

(2) 灰度级数 由于采取了保持最小灰度间隔的算法,在原始图象中,灰度不同的象素,处理后灰度至少相差一级,从而保证了总灰度级数不减少.

(3) 处理效果 从 GBPHE 的处理流程,我们会遇到这样一个问题,假如原始图象的灰度范围已经达到或接近系统的动态范围,即公式(7)中的  $g' - g$  很小,则会造成式(7)中的增强项为 0 或很小,反应在效果上就是没有达到增强的目的或效果不明显.

这说明了 GBPHE 算法只适用于那些灰度范围相对比较小的图象的增强.但幸运的是,目前需要增强的图象其灰度都是集中在较暗的较小区域内,尽管大多数需要增强处理的图象都是偏暗的,即其灰度主要集中在偏暗的范围里,但无论在均值的哪一侧,都还有比较大的灰度空间用来拉伸灰度,使算法达到比较理想的增强效果.

(4) 噪声敏感性 噪声对算法的影响发生在下面两个处理阶段:

① 进行灰度映射时,附加在象素点上的噪声也一同被映射到输出图象中.由于对比度增强算法在进行灰度映射时,算法不考虑象素点与其周围的相

对关系,因而不会发生像锐化算法一样,噪声点被特别加强的现象.

② 映射函数的生成以直方图为依据,而直方图的统计是对图象进行的,因此图象中附加的噪声将对直方图的统计有一定影响.

假如无噪图象的灰度分布密度函数(即归一化的直方图)是  $f(x)$ ,噪声是方差为  $\sigma^2$  的加性高斯白噪声,则根据概率论的原理,有噪图象的灰度密度函数应该是  $f(x)$  和噪声分布密度函数的卷积

$$f_n(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) n(z - x) dx \quad (26)$$

其中,  $n(x)$  是高斯分布  $N(0, \sigma^2)$  的分布密度函数.考虑到当高斯变量的取值离均值 0 超过  $3\sigma$  时,其概率非常小,故可以忽略,因此上式可简化如下

$$f_n(z) = \int_{z-3\sigma}^{z+3\sigma} f(x) n(z - x) dx \quad (27)$$

图象信号象素之间的空间相关性和灰度相关性都很大,如果附加的噪声较小,即  $z \pm 3\sigma$  范围不大时,可以近似地将  $f(x)$  视为常数,则上式可以近似为

$$f_n(z) = f(x) \quad (28)$$

可见,当噪声不大时,对直方图统计的影响很小.

由此可见,GBPHE 在图象信噪比较大时,才能保证获得比较好的处理效果.如果用这种算法处理图象,应该针对低噪声图象进行处理或对图象进行噪声抑制预处理.

### 3 算法计算机仿真比较结果

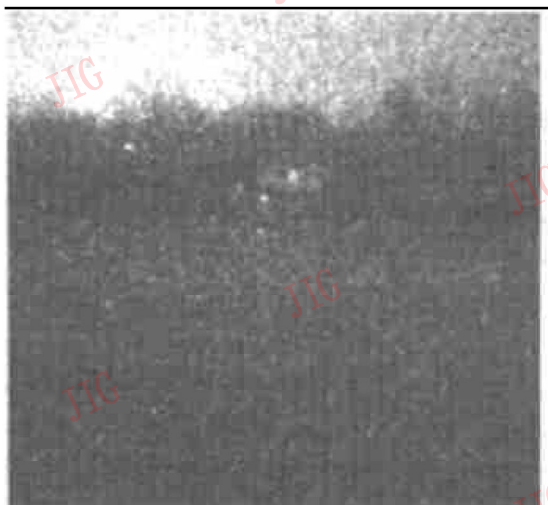
为了对算法的效果有一个感性认识,本文对大量图象用不同的算法进行了仿真比较,这里选取“校园晚景”和“汽车”作为例子.图 1(a) 及(c) 是两幅总体对比度很低的夜景原始图象,但带有局部明亮区域,比如图 1(a) 上部的山脉、晚霞影象及图 1(c) 上部的天空影象.通过对其分别进行 GBPHE 处理,从处理后的图 1(b) 和图 1(d) 可以看出,处理后图象保留了图象的亮度信息,对细节的保留也比较好.当然,GBPHE 为了兼顾各个部分的细节保留,必然牺牲某些部分的增强力度,比如图 1(b) 中左上角的山区景色的对比度不够大,但仍然可以清晰地分辨出山脉的各个层次.



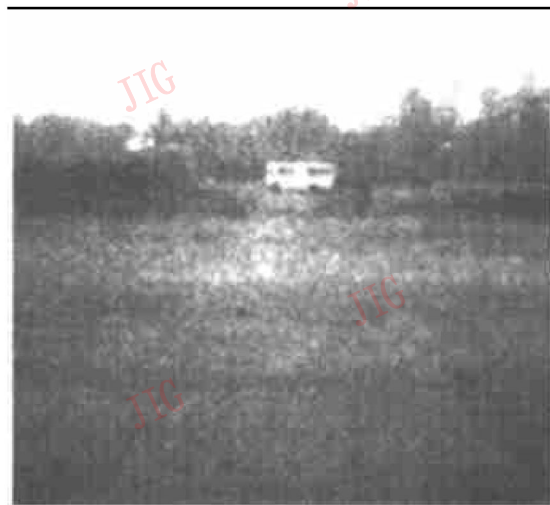
(a) 清华大学校园晚景原始图象



(b) 经 GBPHE 处理的清华大学校园晚景图象



(c) 汽车原始图象



(d) 经 GBPHE 处理的汽车图象

图 1 算法处理效果仿真

### 4 结 论

本文推导出一个保持亮度和灰度级数的直方图均衡算法(GBPHE),通过理论分析和计算机仿真处理,可以得出以下结论: ① GBPHE 算法具有很好的亮度保持性能; ② 对于灰度范围较小的图象,比如微光图象,有明显的对比度增强效果; ③ 由于防止了灰度级合并的发生,因而 GBPHE 比较好地保留了图象的各部分细节. 另外,仿真中发现,对于某些图象,GBPHE 相对于 HE 和 BBHE 在一些局部的增强力度方面有所下降,因此,如何在增强力度和细节保留之间找到更好的折中力度,以及如何更好地兼顾二者是一个有待进一步研究的课题.

### 参 考 文 献

- 1 William K. Pratt. Digital image processing. New York: Wiley, 1991.
- 2 Yeong-Taeg Kim. Contrast Enhancement Using Brightness

Preserving Bihistogram Equalization. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1997, 43(1): 1~ 8.



**沈嘉励** 1975 年生, 1997 年获南开大学理学学士学位, 现为清华大学电子工程系硕士研究生. 主要研究方向是高速实时数字信号处理、图象信号处理等.



**张 宇** 1972 年生, 清华大学电子工程系博士研究生. 主要研究方向为实时图象处理、微光夜视.

**王秀坛** 1947 年生, 1970 年毕业于清华大学无线电电子学系, 现为清华大学电子工程系副教授. 主要研究方向是高速实时数字信号、雷达信号、图象信号处理等.