

同态滤波在光照补偿中的应用

罗海霞, 刘 斌, 龙永红, 谭雪利

(湖南工业大学, 湖南 株洲 412008)

摘要: 通过对照度场的频谱分析得到光照特性, 据此设计了适用的同态滤波器模型和表达式参数。在此基础上, 将同态滤波方法应用到彩色图像的光照补偿中, 保持彩色图像的色度和饱和度不变, 将同态滤波方法应用到亮度分量上。实验结果表明, 该方法不仅能快速准确地获取同态滤波器的参数, 而且对彩色图像的光照补偿更为有效。

关键词: 同态滤波; 光照补偿; 彩色图像

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)05-0023-05

Application of Homomorphic Filtering in Illumination Compensation

Luo Haixia, Liu Bin, Long Yonghong, Tan Xueli

(Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: Through the spectrum analysis of illumination, homomorphic filter model and parameters expression are designed. On this basis, the homomorphic filtering method is applied to the brightness of color image, maintaining the same hue and saturation, to achieve illumination compensation of color image. Experimental results show that the method can not only access the homomorphic filter parameters quickly and accurately, but also achieve illumination compensation of color image more effectively.

Key words: homomorphic filter; illumination compensation; color image

0 引言

在图像的获取过程中, 由于拍摄环境的复杂性, 当光照条件(包括强度和光谱组成)变化时, 采集的图像差别较大, 影响图像的定性和定量分析, 因而必须对图像进行光照补偿^[1,2]。目前, 光照补偿技术广泛应用于印刷质量检测、目标跟踪、医学图像分析、智能交通等诸多关于图像处理的系统中。光照强度补偿主要是消除由于实际光照条件不均匀, 偏光、侧光、高光等导致的过亮、过暗、阴影的影响。

在光照强度补偿算法中, 对于均匀的光照变化, 常使用直方图均衡法、Gamma校正和对数变换等方

法; 对于非均匀的光照变化, 代表性的方法有基于频域的同态滤波方法^[3-4], top-hat变换法和双立方插值法等^[5]。top-hat变换法和双立方插值法计算量较大, 应用较少。同态滤波能减少低频成分并增加高频, 从而减少光照变化并锐化边缘或细节, 广泛应用于不均匀光照下图像的补偿。但是, 同态滤波器的截止频率 D_0 需经大量实践、反复比较才能确定^[6], 且现有的同态滤波方法只能直接对灰度图像进行处理, 还不能应用到彩色图像的光照补偿中。

本文简要介绍了同态滤波原理, 通过对光照场的频谱分析, 设计了一种同态滤波器的参数选取方法, 同时, 运用同态滤波方法对彩色图像进行了光照补偿。

收稿日期: 2008-08-25

基金项目: 湖南省科技厅科技攻关计划基金资助项目(2007FJ3032)

作者简介: 罗海霞(1982-), 女, 湖南桂东人, 湖南工业大学硕士研究生, 研究方向为智能控制与图像处理。

1 同态滤波算法

同态滤波法是一种增强图像对比度和压缩图像亮度范围的特殊滤波方法，它能减少低频成分并增加高频，从而减少光照变化并锐化边缘或细节图像。图像 $f(x, y)$ 可以用它的入射分量 $i(x, y)$ 与反射分量 $r(x, y)$ 的乘积来表示，即： $f(x, y)=i(x, y) \cdot r(x, y)$ 。(1)

不均匀光照体现在入射分量 $i(x, y)$ 中，属于变化缓慢的低频成分；而图像的细节等特性则主要反映在图像的反射分量 $r(x, y)$ 中，属于高频成分。对于照明不均匀的图像的处理，就是要尽量削减入射分量的影响，即压制图像的低频分量，同时增强物体的反射分量，即放大图像的高频分量。

对式(1)取对数可得：

$$\ln f(x, y)=\ln i(x, y)+\ln r(x, y), \quad (2)$$

再对上式进行傅立叶变换，得频域表达式：

$$F(u, v)=\text{Im}(u, v)+\text{Re}(u, v) \quad (3)$$

假设用一个滤波器函数 $H(u, v)$ 来处理 $F(u, v)$ ，得：

$$H(u, v) F(u, v)=H(u, v) \text{Im}(u, v)+H(u, v) \text{Re}(u, v), \quad (4)$$

逆变换到空域，得： $h_f(x, y)=h_i(x, y)+h_r(x, y)$ ，(5)

对式(5)两边取指数，可得：

$$g(x, y)=\exp h_f(x, y)=\exp h_i(x, y) \cdot \exp h_r(x, y) \quad (6)$$

同态滤波过程如图1所示，图中 $H(u, v)$ 称为同态滤波函数。

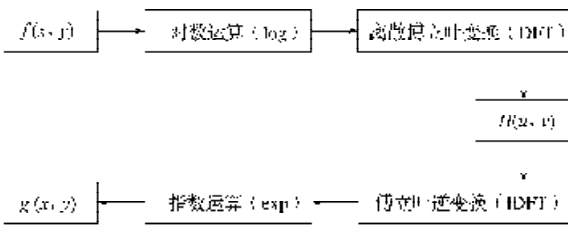


图1 同态滤波过程

Fig. 1 Processing of homomorphic filter

根据图像特性和需要，选用不同的滤波器传递函数 $H(u, v)$ ，它能以不同的方法影响傅立叶变换的高、低频成分，同态滤波函数关系如图2所示。图中： R_h 代表高频增益， R_l 代表低频增益， $D(u, v)$ 表示频率 (u, v) 到滤波器中心 (u_0, v_0) 的距离。

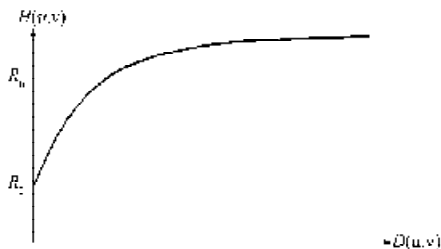


图2 同态滤波函数

Fig. 2 Classical homomorphic filter function

同态滤波器是通过修改高通滤波器得到与

其相对应的同态滤波器，常用的巴特沃斯型同态滤波器滤波函数为：

$$H(u, v) = (R_h - R_l) \frac{1}{1 + \left(\frac{D_0}{D(u, v)} \right)^{2n}} + R_l, \quad (7)$$

式(7)中： D_0 为 $(u_0, v_0)=(0, 0)$ 时 $D(u, v)$ 的值，表示截止频率；

常数 c 被引入用来控制滤波器函数斜面的锐化，它在 R_h 和 R_l 之间过渡，当 $R_h > 1, R_l < 1$ 时，减小低频和增强高频，使得动态范围压缩和对比度增强；

D_0 的选择较困难，它与照度场和反射系数场对应的频谱幅度对比度有关，需大量实践比较选择合适的值。

2 同态滤波器参数的选取

由于截止频率 D_0 与照度场和反射系数有关，而传统的同态滤波方法只能通过大量实践来选择，费时费力且效果欠佳。本文通过对照度场的频谱分析得到光照特性，从而选取滤波器参数。

在频率空间，图像的信息表现为不同频率分量的组合。一个图像尺寸为 $M \times N$ 的函数 $f(x, y)$ 的离散傅里叶变换由以下等式给出：

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j \pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right)}, \quad (8)$$

其中： $u=0, 1, 2, \dots, M-1; v=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

$$\text{频率谱 } |F(u, v)| = \left[\text{Re}^2(u, v) - \text{Im}^2(u, v) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

其中， $\text{Re}(u, v)$ 和 $\text{Im}(u, v)$ 分别是 $F(u, v)$ 的实部和虚部。

假设光照是绝对均匀的，光照场的频谱只有直流分量，随着光照不均匀程度的增加，谐波分量所占比例增加。在不均匀光照条件下，通过计算第 n 次谐波分量占谐波总量的比例，容易得到所占比例较大的谐波频率范围对应的频率即为带阻滤波器的上、下限频率。具体算法如下：

- 1) 用 $(-1)^{x+y}$ 乘以输入图像进行中心变换，将 $F(u, v)$ 原点变换到频率坐标下的 $(M/2, N/2)$ ；
- 2) 由式(8)计算1)的离散傅立叶变换，即 $F(u, v)$ ；
- 3) 计算点 (u, v) 到频率矩形原点的距离，如下示：

$$D(u, v) = \sqrt{\left(\frac{u - M/2}{2} \right)^2 + \left(\frac{v - N/2}{2} \right)^2}; \quad (10)$$

4) 由式(9)计算不同 $D(u, v)$ 对应的频率谱 $|F(u, v)|$ ，它们位于以原点为中心、 $D(u, v)$ 为半径的圆周上；

5) 计算不同半径 $D(u, v)$ 的圆周包围的图像功率

$P(u, v)$ 占总图像功率 P_t 的比例 α , 其步骤为

$$P(u, v) = |F(u, v)|^2, \quad (11)$$

$$P_t = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} P(u, v), \quad (12)$$

$$\alpha = \left[\sum_u \sum_v \frac{P(u, v)}{P_t} \right] \times 100\%; \quad (13)$$

6) 把 α 从大到小进行排序, 计算前 n 项的和 S , 当 $S > 0.7$ 时停止计算, 对应的 $D(u, v)$ 的范围分别为上、下限频率 D_{01} 、 D_{02} ;

7) 通过对巴特沃斯高、低通滤波器进行修改得到带阻滤波函数, 该同态滤波函数关系如图 3 所示。

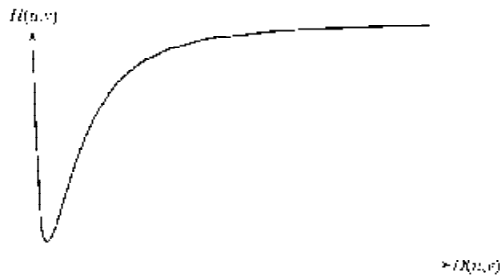


图 3 改进的同态滤波函数

Fig. 3 Improved homomorphic filter function

函数表达式如下:

$$H(u, v) = \frac{1}{1 - \left(\frac{D(u, v)}{D_{01}} \right)^2} + \frac{1}{c \left[1 + \left(\frac{D_{02}}{D(u, v)} \right)^2 \right]}. \quad (14)$$

在相同光照条件下拍摄的图像, 通过带阻滤波器滤除该范围内的频率, 得到光照补偿后的图像。

3 同态滤波对彩色图像的光照补偿

已有的同态滤波只能直接对灰度图像进行处理, 要运用同态滤波函数对彩色图像进行处理, 可将同态滤波方法用到彩色图像亮度分量上, 而保持色度和饱和度不变, 得到处理后的图像, 此过程可用图 4 描述。

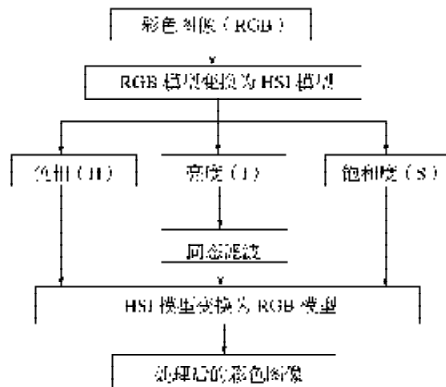
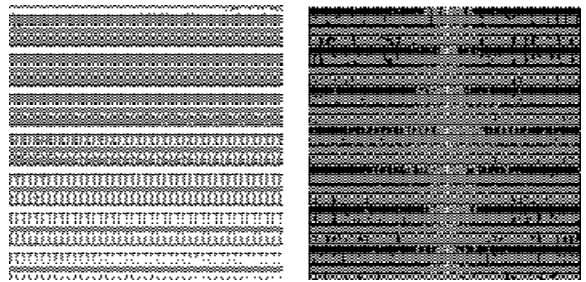


图 4 彩色图像的同态滤波过程

Fig. 4 Processing of homomorphic filter of color image

4 实验结果与分析

为了较好地观察到补偿效果并进行比较, 本文设计实验进行验证, 具体实验步骤如下: 1) 在 CIE 标准观测条件下拍摄标准白板^[7]图像如图 4 a) 所示, 在相同拍摄环境下, 拍摄色标图像如图 5 中 a) 所示; 2) 由式 (8) 计算图 4 中 a) 的 DFT, 即 $F(u, v)$, 画出频谱图如图 4 中 b) 所示; 3) 根据上述方法, 选择合适的同态滤波函数 $H(u, v)$; 4) 用滤波器函数 $H(u, v)$ 对色标图像图 5 中 a) 进行处理; 5) 计算同态滤波处理前后色标的灰度平均值和标准差, 并进行比较。



a) 标准白板图像 b) 标准白板图像的频谱图

图 5 标准白板图像及其频谱图

Fig. 5 Image and its fourier spectrum of standard white board

表 1 给出了本文所述的 2 种同态滤波器的表达式式 (7) 和式 (14) 的参数取值。

表 1 同态滤波参数值

Table 1 Homomorphic filter

同态滤波方法	同态滤波参数					
	R_h	R_l	C	D_0	D_{01}	D_{02}
巴特沃斯	2.2	0.8	0.414	3	-	-
改进的巴特沃斯	-	-	0.414	-	5	15

灰度色标图像如图 6 中 a) 所示。由于照度不均匀的影响, 色标的灰度值差别较大。在频域内对图 6 中 a) 分别用巴特沃斯型同态滤波器和改进的巴特沃斯型同态滤波器进行图像处理, 得到处理后的图像如图 6 中 b)、c) 所示。

表 2 为通过上述同态滤波器后色标的灰度平均值和标准差。

彩色色标图像如图 7 中 a) 所示, 在频域内对图 7 中 a) 分别用巴特沃斯型同态滤波器和改进的巴特沃斯型同态滤波器进行图像处理, 得到处理后的图像如图 6 b)、c) 所示。表 3 分别计算了通过上述同态滤波器后色标的 R 、 G 和 B 的平均值、标准差。

从图 5、图 6 的对比可以看出, 运用同态滤波器虽然可以将图像中的细节显示出来, 在增强高频的同时保留部分低频信息, 实现压缩动态范围和对比度增强, 但经改进的同态滤波器的效果优于巴特沃斯型同

态滤波器。表2的数据表明,经同态滤波处理后,色标的灰度值趋于均匀,标准差明显减小;表3的数据表明,经同态滤波处理后,色标的 R 、 G 、 B 值趋于均

匀,标准差明显减小,但经改进的同态滤波器对光照不均匀图像的补偿效果优于巴特沃斯型同态滤波器。

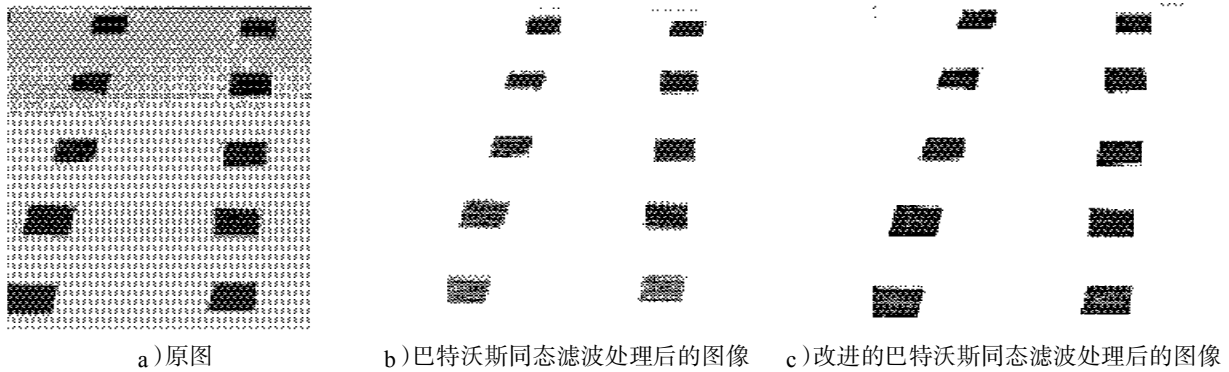


图6 灰度图像处理结果
Fig. 6 Results of the proposed method

表2 灰度平均值及标准差
Table 2 Average Gray value and the standard deviation

色标状态	色块						标准差
	1	2	3	4	5	6	
同态滤波前	105.214 3	110.123 5	120.476 6	106.267 9	115.300 0	130.588 9	9.676 8
巴特沃斯滤波后	152.817 5	160.481 5	167.273 4	154.090 9	162.988 9	172.672 2	7.634 0
改进的巴特沃斯同态滤波后	81.034 2	81.385 7	90.547 7	78.691 6	86.862 4	97.053 4	6.970 5

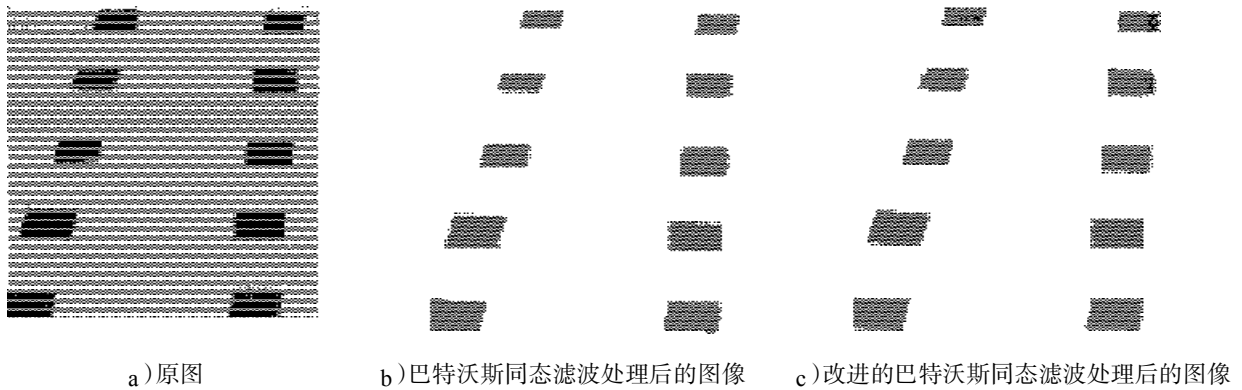


图7 彩色图像处理结果
Fig. 7 Results of the proposed method

表3 R 、 G 、 B 平均值及标准差
Table 3 Average R 、 G 、 B value and the standard deviation

色标状态	色标指标	色块						标准差
		1	2	3	4	5	6	
同态滤波前	R	205	208	216	208	215	220	7
	G	77	88	128	81	94	119	21
	B	80	88	106	80	98	120	16
巴特沃斯滤波后	R	214	217	224	216	223	228	5
	G	91	102	103	94	106	129	14
	B	108	116	131	107	107	142	14
改进的巴特沃斯同态滤波后	R	229	231	236	230	236	239	4
	G	105	116	115	107	119	140	12
	B	93	102	116	93	110	121	11

5 结论

从实验结果可知: 在频域内的同态滤波方法只要选取适当的滤波器参数, 就可以在增强图像高频信息的同时保留部分低频信息, 达到压缩图像灰度的动态范围, 增强图像的对比度的效果。本文通过光照场的频谱分析, 能快速准确地选取滤波器参数。改进的同态滤波器的效果优于巴特沃斯型同态滤波器, 对光照不均匀的图像的补偿效果更显著。

参考文献:

[1] Barnard K, Cardei V, Funt B. A comparison of computational color constancy algorithms-Part I: Methodology and experiments with synthesized data[J]. IEEE Trans. Image Processing, 2002, 11(9): 972-984.

[2] Kobus Barnard, Lindsay Martin, Adam Coath. A comparison of computational color constancy algorithms-Part II: Experiments with image data[J]. IEEE Trans. Image Processing, 2002, 11(9): 985-995.
 [3] 阮秋琦, 阮语智. 数字图像处理[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2006.
 [4] 杨 杰, 付忠良, 阮 波. 照度不均匀图像的快速自适应灰度修正[J]. 计算机应用, 2005, 25(3): 598-600.
 [5] 王 宇, 龙兴武. 基于小波的不均匀光照的校正[J]. 光学技术, 2005, 31(5): 726-728.
 [6] 陈春宁, 王延杰. 在频域中利用同态滤波增强图像对比度[J]. 微计算机信息, 2007, 23(2): 264-266.
 [7] Wei Zhou, Chandra Kambhamettu. A unified framework for scene illuminant estimation[J]. Image and Vision Computing, 2008, 26: 415-429.

(责任编辑: 张亦静)



(上接第6页)

式(13)。下面证明式(13)为 $A\{3,4\}$ 的通式。

设 G 由式(13)给出,

$$AG = AA^+gAA^- \in H^m,$$

即 $G \in A\{3\}$ 。又因为 $GA - A^-gA \in H^m$, 所以 $G \in A\{4\}$ 。

反之, 对于任意的 $G_0 \in A\{3,4\}$, 利用引理2, 不难推证 G_0 可以表示为式(13)右端中取 $z=G_0, g=AG_0$ 的形式。因此式(13)为 $A\{3,4\}$ 的通式。

下面给出式(13)中的 g 在矩阵 A 的奇异值分解下的一种刻化。

定理7 设 A 的奇异值分解为

$$A = U \begin{pmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} V^T, \tag{14}$$

其中 $U \in H^m, V \in H^n, \Sigma = \text{diag}(\sigma_1 I_{n_1}, \dots, \sigma_k I_{n_k})$, $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_k > 0, n_1 + n_2 + \dots + n_k = r$, 则

$$g = U \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{13} & X_{14} \end{pmatrix} U^T, \tag{15}$$

其中 $X_{11} = \text{diag}(X_{n_1}, \dots, X_{n_k}), X_{n_i} \in H^{n_i}, i = 1, 2, \dots, k;$

$$X_{12} \in C^{r \times (n-r)};$$

$$X_{14} \in H^{(r-r)}.$$

证明 在 A 的奇异值分解式(14)下

$$A^+ = V \begin{pmatrix} \Sigma^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} U^T, \tag{16}$$

将 U^*gU 适当分块为

$$U^*gU = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{pmatrix}. \tag{17}$$

利用式(14)、(16)、(17)及 $A^+gA \in H^r$, 不难推得式(15)。证毕。

参考文献:

[1] 戴 华. 矩阵论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
 [2] 王国荣. 矩阵与算子广义逆[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
 [3] 何旭初, 孙文瑜. 广义逆矩阵引论[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1990.
 [4] 何楚宁. 复矩阵的几种Penrose逆的通式[J]. 曲阜师范大学学报: 自然科学版, 1996(1): 17-20.
 [5] 庄瓦金. 四元数矩阵的加正定权的Moore-Penrose型广义逆的显公式[J]. 数学的认识与实践, 1988(3): 68-74.
 [6] 何楚宁. 实对称矩阵在相合分解下的Moore-Penrose型广义逆的通式[J]. 高等学校计算数学学报, 2006(9): 236-242.
 [7] 何楚宁. 矩阵在置换分块下的广义逆通式[J]. 湖南师范大学学报: 自然科学版, 2006(12): 1-5.
 [8] Ben-Israel A, Greville I N E. Generalized Inverses Theory and Applications[M]. 2nd Edition. New York: Springer Verlag, 2003.
 [9] Wang G, Wei Y, Qiao S. Generalized Inverses[M]. Beijing: Theory and Comput., Science Press, 2004.

(责任编辑: 廖友媛)