

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2011)08-1429-08

论文索引信息: 郑伟华, 戴永. 自适应同态对数光照补偿 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(8): 1429-1436

自适应同态对数光照补偿

郑伟华^{1),2)} 戴永²⁾

¹⁾ (湘潭大学信息工程学院, 湘潭 411105) ²⁾ (湖南工业大学计算机通信学院, 株洲 412008)

摘要: 人脸检测有广泛的应用前景,但目前的许多人脸检测算法对光照有一定的要求,过亮过暗偏光图像使检测率急剧下降。提出一种自适应同态对数光照补偿方法,用对数函数作为基函数,使变换后的图像符合人的视觉特点;设置对数函数的平移系数,使变换对各种程度过暗过亮偏光阴影图像都可以进行有效的补偿;引入同态补偿公式来补偿光照的同时增强图像细节,使变换后的图像更清晰。实验结果表明,该方法对过暗过亮的人脸图像都可以进行有效的光照补偿,有助于提高人脸检测率。

关键词: 光照补偿;自适应变换;同态滤波;同态补偿;对数变换;人脸检测

Adaptive logarithm for facial illumination compensation based on homomorphic gomomorphic module

Zheng Weihua^{1),2)}, Dai Yong²⁾

¹⁾ (The College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

²⁾ (School of Computer and Communication, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China)

Abstract: Face detection has wide applications. But many of the detection algorithms are sensitive to illumination variation. Detection rates usually drop quickly if the illumination is too bright, too dark, or non-uniform illumination. This paper proposed a adaptive logarithm illumination compensation method based neighbour remediation technique, the method use logarithm function as primary function, therefore it's true of human visual trait; and setup the offset's coefficients of logarithm function to solve the illumination problem in varying degree, thus this method is ability of compensation of all types of image in varying degrees through adjusting the coefficients; and introduce a remediation technique based neighbour area to reduce illumination influence and enhance image details, so the resource of the image which transformed has been improved. Experimental results show that this method is effective in compensating facial images of over-lighting and over-shading, and it is beneficial to improve the facial detection rate.

Keywords: illumination compensation; adaptive transformation; homomorphic filtering; remediation technique based neighbour area; logarithm transformation; face detection

0 引言

目前,大多数人脸检测和人脸识别系统都是在受限的姿势和光照条件下进行工作的,人脸检测的

训练样品和待检测图片的光照不规范会影响人脸检测和人脸识别的执行。光照问题^[1]一直是人脸检测和人脸识别问题的重要研究内容,训练样品和待检测图像中的过亮过暗图像的存在均会使人脸检测率和识别率大幅度下降。所以应该对图像的光照进

收稿日期:2009-07-16;修回日期:2010-09-17

基金项目:湖南省高校创新平台开放基金项目(09K040);湖南省教育厅基金项目(09c327)。

第一作者简介:郑伟华(1969—),男,系统分析师。2010年于湘潭大学获计算机技术领域工程硕士学位,主要研究方向为检测和机器学习。E-mail:newsettler2010@163.com。

行补偿,使高光过亮图像的光照得到减弱,使偏光过暗图像的光照得到增强。针对光照问题,人们已经提出了多种解决方法。解决光照问题的一般方法是采用对光照变化不敏感的图像表示方法,如图像的边缘图^[2],利用人脸器官的横纹特征对光照不敏感的特性,即文献[3]所提方法,灰度图像的一、二阶导数^[4]等,非线性变换^[5-7]等图像增强技术也经常用于光照补偿。除了上面提到的基于图像处理的方法,光照补偿的另一大类方法是基于模型的方法。基于模型的方法在原理上比基于图像处理的方法更完善,基于模型的方法一般是利用数学模型重构标准化光照条件下人脸,如 SFS (shape-from-shading) 方法^[8]、球面谐波函数建模^[9]等。这类方法适用面广,可以得到满意的效果,但这类方法计算复杂,需要高度简化模型。上述方法都有其局限性,文献[2-4]所提方法没有考虑到人的视觉特点,文献[5-7]所提方法没有解决针对相同灰度值的像素在不同区域应该进行不同补偿的问题,文献[8-9]提出的方法需要建立复杂的数学模型,计算复杂。本文提出自适应同态对数光照补偿方法从视觉心理的角度出发,以对数函数为基函数,使补偿后的图像更自然,符合人类视觉特点;采用自适应对数变换技术使对数变换可以适应所有程度图像的光照补偿;采用同态补偿技术分化图像照度分量和图像反射分量,使光照对图像的影响减少,使图像的细节得到增强。对多幅具有典型意义的人脸图像的实验表明,采用同态补偿技术的光照补偿方法处理的人脸图像非常清晰,采用自适应变换技术的方法可以对各种光照程度的图像进行有效补偿。

1 对数变换

人视觉感受的光照亮度是眼睛入射光强的对数函数。因此,对数变换后的图像感觉柔和,符合人的视觉特点。

对数变换使低灰度范围的 $f(x, y)$ 得以扩展而高灰度 $f(x, y)$ 得到压缩,增强了图像的对比度,对

$$\begin{cases} g(f(x, y)) = a + b \frac{\ln(f(x, y) + d + 1) - \ln(d + 1)}{\ln(b + d + 1) - \ln(d + 1)} & f(x, y) \in \text{过暗} \\ g(f(x, y)) = e^{\frac{(f(x, y) - a)(\ln(b + d + 1) - \ln(d + 1))}{b} + \ln(d + 1)} - d - 1 & f(x, y) \in \text{过亮} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)就是自适应对数变换光照补偿公式,在式(2)中,光照问题严重的图像补偿的幅度大, d 的取值

光照不足的图像有很好的补偿作用,但对过亮高光的图像没有补偿效果,甚至产生漂白。文献[6]提出复合变换来解决这一问题,但复合变换没有考虑到复合变换压缩了图像的中间阶灰度像素的信息量,造成了人脸信息的损失,不利于人脸检测。

真实的待检测图像中,同时包含(须要补偿的)过亮区域和过暗区域的图像很少。所以可以把光照问题简化为两个光照子问题:过暗图像的光照补偿和过亮图像的光照补偿。本文用对数变换对过暗图像进行光照补偿,用反对数变换对过亮图像进行光照补偿,如式(1)。对过亮图像不采用指数变换和反对数变换的理由和过暗图像采用对数变换一样,都是因为考虑到人的视觉心理所致。

$$\begin{cases} g(x, y) = a + b \frac{\ln(f(x, y) + 1)}{\ln(b + 1)} & f(x, y) \in \text{过暗} \\ g(x, y) = e^{\frac{(f(x, y) - a) \ln(b + 1)}{b}} - 1 & f(x, y) \in \text{过亮} \end{cases} \quad (1)$$

式中, a 是图像可以存在的最小灰度值, b 是图像可以存在的最大灰度值。

2 自适应对数变换

式(1)可以对过暗图像和过亮图像进行光照补偿。但由于图像的光照问题程度变化很大,必须对不同程度光照采用不同程度的光照补偿。式(1)对所有图像采用无差别补偿方法,有时会造成图像信息的损失,对人脸检测产生负面作用,减少人脸检测率。本节提出的自适应对数变换技术采用增加对数函数平移系数的方法来控制图像变换的剧烈程度,以此达到控制图像光照精确变换到标准光照的目的。

2.1 对数函数的平移

为了控制光照补偿的程度,本文在式(1)中引入了对数函数平移系数 d ,使式(1)可以控制图像光照补偿的剧烈程度,修改后的计算模型为

小;光照问题轻微的图像补偿的幅度小, d 的取值大。 d 的具体算法在下一小节讨论。

表 1 列出了对数变换 3 个不同平移系数 d 的变换结果, d 分别取值 0、50 和 100。在原对数变换 $\ln(f(x,y) + 1)$ 中,250 ~ 254 这 5 个灰度值对应变换后 254 一个值,是五对一变换;在向右平移了 50 的 $\ln(f(x,y) + 50 + 1)$ 变换中,253、254 两个灰度值对应变换后的 254 一个灰度值,是二对一

的变换;在向右平移了 100 的 $\ln(f(x,y) + 100 + 1)$ 的变换中,原灰度 254 一对一的对应变换后的 254,是一对一的变换。显然函数向右平移越多,变换曲线越平缓,保留了原图像的信息越多,但光照补偿的幅度也越小。由表 1 可以看出,参数 d 具有控制变换缓急的功能。

表 1 $\ln$ 函数、 $\ln(f(x,y) + 50)$ 函数和 $\ln(f(x,y) + 100)$ 函数灰度值对照表
Tab. 1 Reference table of $\ln()$, $\ln(f(x,y) + 50)$ and $\ln(f(x,y) + 100)$

灰度	0	1	2	...	100	101	102	103	...	249	250	251	252	253	254	255
$\ln f$ 变换	0	31	50	...	212	212	213	213	...	253	254	254	254	254	254	255
$\ln(f + 50)$	0	2	5	...	154	155	156	157	...	252	252	253	253	254	254	255
$\ln(f + 100)$	0	1	3	...	139	140	141	142	...	251	252	252	253	253	254	255

2.2 函数平移系数 d 的计算

要计算式(2)中的平移系数 d ,先必须解决图像光照标准的判断问题,为此特做出如下两个光照标准的定义。

定义 1 图像平均灰度值 M ,如果图像的灰度值范围是 $[a,b]$,则 $M < \frac{a+b}{2}$ 被认定为过暗, $M > \frac{a+b}{2}$ 被认定为过亮, $M = \frac{a+b}{2}$ 被认定为标准光照图像。

定义 2 图像平均灰度值 M ,图像灰度值范围是 $[0,255]$,则 $M < 103$ 被认定为过暗, $M > 167$ 被认定为过亮, M 在 $[103,167]$ 范围之内则被认定为标准光照图像。

因为光照问题是复杂多样的,目前没有一个计算标准,定义 1 的标准太简单,按此标准进行的光照补偿容易受图像背景影响。定义 2 考虑真实系统的实际情况和人的视觉心理,将标准光照定义为一个范围,这样有利于标准在真实系统的应用。

根据定义可知, d 的下界为 $d = -1$,是对数函数极限,也是变换的极限; d 的上界可以使平均灰度值 $M = 255$ 的图像变换到标准图像,建议上界取值 10 000; d 初值设为 $d = 0$ 。

下面就是平移系数 d 的算法:

1) 计算图像 $f(x,y)$ 的直方图 H (即计算各阶灰度值 i 在图像 $f(x,y)$ 中出现的概率 p_i)。

2) 计算图像 $f(x,y)$ 的平均灰度值 $M = \sum_{i=a}^b i \cdot p_i$ 。

3) 初始化 $d = 0$ (d 的变化范围为 $(-1, 10\ 000)$)。

4) 将直方图 H 经过式(2)变换生成新的直方图 H 。

5) 再根据新生成的直方图 H 计算变换后的平均灰度值 $M = \sum_{i=a}^b i \cdot p_i$,如果 M 在标准光照图像灰度范围,终止计算。

6) 根据 M 值调整 d 值,如果 $d \neq -1$ 重复 4)、5) 和 6) 这 3 步,否则结束 (表示达到对数函数变换极限)。

当 d 计算成功后,再利用式(2)就可以完成光照补偿变换。

3 光照的同态补偿

图像经过式(2)变换后,图像的光照得到了改善,但图像变得模糊。造成这种情况发生的主要原因是式(2)缺少区分图像光照部分和图像反射部分的能力,因此,变换使图像细节和图像光照一起被补偿了。比如,变换使头发、眉毛、瞳仁等和阴影等价被补偿了。头发、眉毛、瞳仁等对光照的反射率极低,对其按人脸偏光阴影区域处理,当然会造成图像的局部失真。同态滤波^[7]方法较好地解决这个问题,但计算代价稍大,不适合即时的人脸检测系统。本文提出的同态补偿技术建立在同态滤波的光照模型基础之上,但又克服了同态滤波计算代价大的缺点。

3.1 同态滤波的数学模型

同态滤波理论认为,一幅图像 $f(x,y)$ 可表示成它的照度分量 (入射分量) $i(x,y)$ 与反射分量

$r(x, y)$ 的乘积, 即

$$f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y) \quad (3)$$

照度 $i(x, y)$ 变化缓慢, 其频率集中在频域的低频段, 而反射分量 $r(x, y)$ 包含了图像中的各种信息, 其高频量丰富。同态滤波方法将图像先转换到频率空间, 对代表光照的低频进行弱化, 对代表细节的高频进行增强^[7]。同态滤波由于要进行两次快速傅里叶变换, 其计算的时间代价是各种基于图像处理方法的 10 倍左右, 不适合实时系统。

3.2 像素的同态补偿公式

根据同态滤波的光照模型, 图像的照度分量频率较低, 所以, 在空域中可以简单的把像素的邻域灰度平均值看成是该像素所在点的图像照度分量 $i(x, y)$, 如式(4),

$$i(x, y) = \frac{\iint_D f(x, y) dx dy}{\iint_D dx dy} \quad (4)$$

式中, D 是像素 (x, y) 的邻域, $i(x, y)$ 是图像 $f(x, y)$ 的照度分量图像。根据式(3)(4)很容易可以计

算出图像的反射分量图像

$$r(x, y) = \frac{f(x, y)}{i(x, y)} = \frac{f(x, y) \iint_D dx dy}{\iint_D f(x, y) dx dy} \quad (5)$$

为了完成图像的光照补偿, 对图像 $f(x, y)$ 的照度分量图像 $i(x, y)$ 进行式(2)的光照补偿变换就可以得到变换后的图像的照度子图像, 再将变换后的图像的照度子图像乘以式(5)的反射分量图像就得到了补偿后的图像

$$g(x, y) = g(i(x, y)) \cdot r(x, y) = g(i(x, y)) \cdot \frac{f(x, y) \iint_D dx dy}{\iint_D f(x, y) dx dy} \quad (6)$$

将式(2)的补偿过暗图像的公式代入式(6), 补偿过亮图像的补偿公式保持不变, 就得到本节的最终公式自适应同态变换公式(7)。由于图像过亮高光区域的图像细节都很清楚, 用不着采用同态补偿技术来加强, 所以变换公式保持不变。如果对过亮高光图像采用同态补偿技术进行补偿, 结果会适得其反。

$$g(x, y) = \begin{cases} \left(a + b \cdot \frac{\ln(i(x, y) + d + 1) - \ln(d + 1)}{\ln(b + d + 1) - \ln(d + 1)} \right) \cdot \frac{f(x, y)}{i(x, y)} & f(x, y) \in \{\text{过暗}\} \\ e^{\frac{(f(x, y) - a) \cdot (\ln(b + d + 1) - \ln(d + 1))}{b} + \ln(d + 1)} - d - 1 & f(x, y) \in \{\text{过亮}\} \end{cases} \quad (7)$$

4 实验及其分析

采用 Yale Face Database II 和自训练 Adaboost 人脸检测系统进行实验。

4.1 Adaboost 人脸检测系统的训练

从 Yale Face Database II 中选择了清楚可识别的未经光照补偿处理的 1 649 个人脸正样品图像和 10 900 个从其他图片上制作的人脸负样品进行了第 1 轮训练, 这些样品都未进行光照补偿处理。训练出来最开始几个分类器特征集中在脸部的右下角, 从物理意义来说反映了人脸下巴的轮廓和局部的图像梯度, 没有反映人脸更本质的特征。第 2 轮训练对 Yale Face Database 的原图像进行了非线性局部光照补偿变换, 训练出的最开始的几个分类器集中在人的眼睛和鼻子这个区域, 很好地反映了人脸的本质特征。

4.2 几种光照补偿方法对过暗图像的补偿比较

图 1 是 8 种光照补偿方法对过暗图像 (184×184) 的处理结果, 其中原图是从 640×480 大小的 yaleB01_P00A + 050E-40. pgm 图像剪切下的人脸, 实验采用第 2 节定义 1 的光照标准。从图中可以看出, 采用同态技术的光照补偿方法补偿后的图像细节清晰, 补偿后原阴影区较干净, 内部较少有颗粒状不干净的东西。采用对数做基函数的方法和 GIC^[10] 补偿后的图像较自然。HE 和 GIC 是对人脸检测有良好表现的两种方法^[11], 为了方便 GIC^[10] 和自适应同态对数方法的比较, GIC 的 $I_0 = I_{ALL}$ (自适应同态对数方法补偿过的图像)。自适应变换技术也容易受图像背景影响, 但相对直方图归一化 HE 来说, 受的影响相对较小。

4.3 几种光照补偿方法对过亮图像的补偿比较

图 2 是几种光照补偿方法对过亮图像的补偿图, 原图是从 yaleB01_P00A + 050E-40. pgm 图像

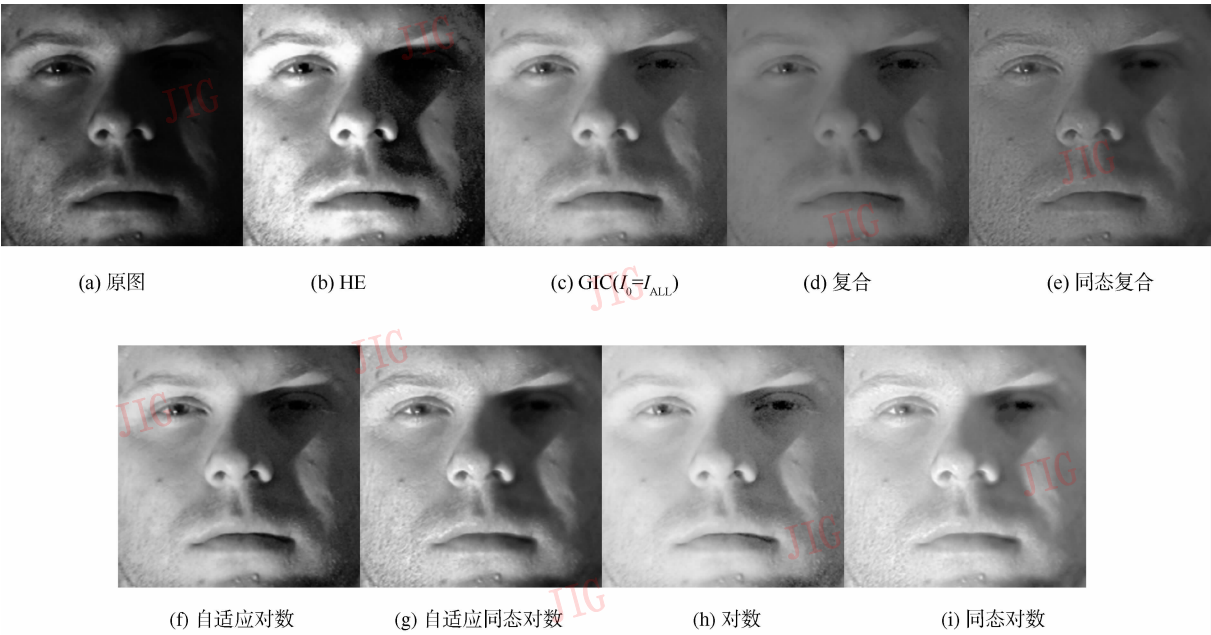


图 1 几种光照补偿方法对过暗图像(184 × 184)的补偿
Fig. 1 The compensation of several methods to over-shading images

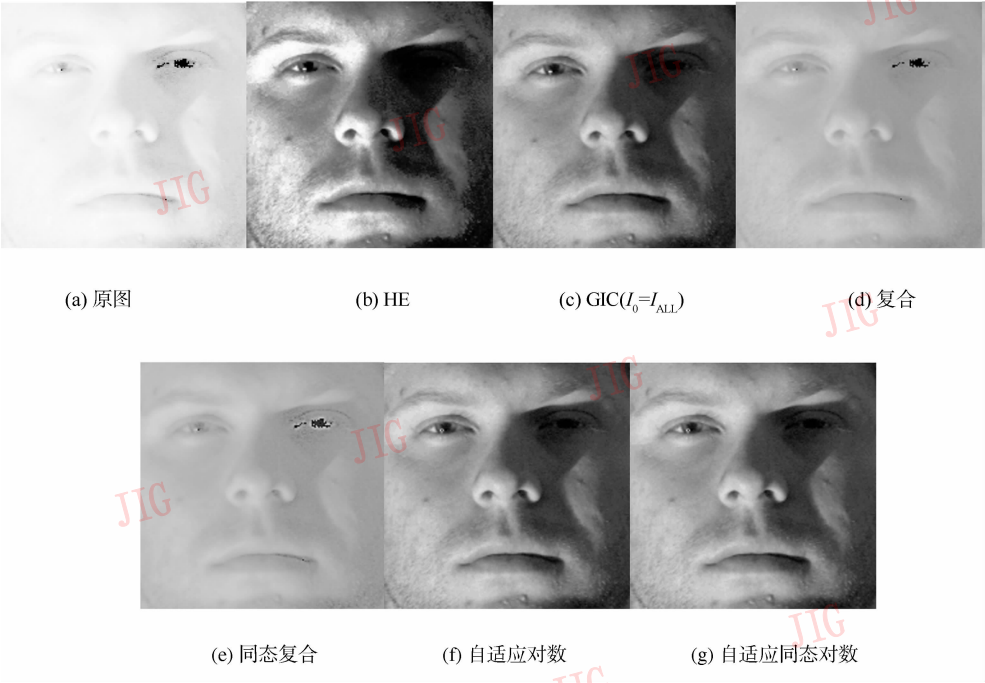


图 2 多方法光照补偿方法对过亮图像(184 × 184)的光照补偿
Fig. 2 The compensation of an over-lighting image by multiply methods

剪切下的 184 × 184 的人脸经过两次 Log 处理形成的。
实验采用第 2 节定义 1 定义的光照标准。
GIC^[10] 的 $I_0 = I_{ALL}$ (自适应同态对数变换处理后

的图像)。从图 2 可以看出,采用自适应同态对数、自适应对数和 GIC^[10] 对过亮图像的补偿效果差不多,这 3 种方法比 HE 处理过的图像较清晰自然。

4.4 变换后图像的自(信息)熵和点锐度

测试用图像集 test、newtest、test-low、shape 和 normality,用多种光照补偿方法补偿后的自(信息)熵和点锐度^[10]如表 2 所示,其中测试集 test、newtest、test-low 是 FRVT 发布的,shape 和 normality 是自制测试图片集,实验采用第 2 节定义 2 的光照标准。

通过表 2 可以看出,采用同态补偿技术的方法补偿的图像,其自(信息)熵和点锐度提高了。自(信息)熵增加的原因在于同态补偿公式基于同态滤波图像模型,弱化了图像中代表光照的低频信息,强化了代表图像细节的高频数据。点锐度可以理解为对图像每个像素点周围的灰度扩散程度的统计,即扩散程度越剧烈,其值越大,图像越清晰^[12]。从表 2 中可以看出,采用同态补偿技术的方法使得图像的点锐度得到了大幅提高,可见其清晰度得到了提高。

4.5 多种光照补偿方法的人脸检测率比较

人脸检测率是检验光照补偿方法的一种主要指标,表 3 是采用自训练 Adaboost 人脸检测系统对多种光照补偿算法进行人脸检测的结果,采用第 2 节定义 2 的光照标准。该检测系统采用 Yale Face Database II 进行训练,训练和级联都采用了新技术,使得该系统对图像的光照有一定的适应性(所以本实验检测率没有拉开差距)。

从表 3 中可以看出,采用同态补偿技术的 3 个方法同态对数、自适应同态对数和同态复合比没采用这种技术的对数、自适应对数和复合变换的检测率略高,GIC^[10]的检测率比同态对数和自适应同态对数的检测率稍低,同态对数和自适应同态对数在大部分的数据集的表现比 HE 要好,对数、复合变换和同态复合变换这 3 种方法的检测率比其他方法低很多。

表 2 几种光照补偿方法补偿后的图像自(信息)熵和点锐度统计表
Tab.2 Statistical graph of entropy and point sharpness of images compensated by serveral motheds

光照补偿方法	熵和 点锐度	test	newtest	test-low	shape	normality
		图像 42 人脸 168	图像 65 人脸 175	图像 23 人脸 145	图像 33 人脸 94	图像 26 人脸 78
无补偿	熵	254. 493	376. 788	126. 901	229. 864	193. 208
	点锐度	2 630. 013	6 310. 061	1 891. 456	1 555. 642	1 508. 392
HE	熵	250. 124	368. 162	125. 339	221. 226	187. 071
	点锐度	4 311. 579	8 611. 989	2 725. 432	2 286. 128	1 991. 289
GIC($I_0 = I_{ALL}$)	熵	253. 004	374. 814	126. 855	227. 618	192. 340
	点锐度	2 856. 366	6 718. 550	1 970. 210	1 677. 718	1 536. 319
对数	熵	228. 885	341. 709	118. 250	200. 176	165. 238
	点锐度	1 792. 043	5 261. 124	1 233. 229	1 337. 382	1 087. 628
同态对数	熵	270. 610	401. 944	151. 605	213. 685	185. 613
	点锐度	2 594. 078	6 115. 618	1 881. 825	1 503. 318	1 484. 180
自适应对数	熵	252. 438	374. 726	126. 828	227. 410	192. 471
	点锐度	2 958. 825	6 926. 127	1 991. 591	1 741. 785	1 584. 707
自适应同态对数	熵	272. 061	411. 937	140. 923	235. 229	195. 844
	点锐度	3 489. 555	8 044. 525	2 253. 416	2 096. 374	1 742. 879
复合	熵	224. 472	341. 706	117. 094	198. 018	162. 559
	点锐度	1 392. 665	3 947. 953	917. 109	966. 743	821. 846
同态复合	熵	259. 655	409. 749	146. 950	213. 059	172. 929
	点锐度	2 509. 305	6 170. 241	1 819. 059	1 478. 237	1 383. 971

表 3 多种光照补偿方法的人脸检测率比较

Tab.3 The comparison of facical detection rate of multiple metheds

光照补偿方法	test	newtest(175)	test-low	shape	normality
	图像 42	图像 65	图像 23	图像 33	图像 26
	人脸 168	人脸 175	人脸 145	人脸 94	人脸 78
无补偿	103	140	77	65	59
HE	111	144	81	63	57
GIC ($I_0 = I_{ALL}$)	102	145	79	64	58
对数	55	121	30	33	37
同态对数	56	122	32	36	39
自适应对数	105	145	82	68	58
自适应同态对数	106	147	81	70	60
复合	46	98	9	26	34
同态复合	46	106	21	48	36

5 结 论

在对对数变换和同态滤波光照模型等进行综合改进的基础上,重点讨论自适应变换技术和同态补偿技术,并给出了自适应同态对数变换光照补偿方法的数学模型,理论和实验结果证明:

- 1) 自适应技术可以应用于以对数变换为基函数的变换(其思想可以应用到以点变换为基础的光照补偿方法中),使之能对不同光照程度图像进行有效补偿。
- 2) 同态补偿技术能提高图像的清晰度,且图像在原阴影区较干净(其他方法处理后的图像原阴影区有不洁净的颗粒)。
- 3) 自适应变换技术和同态补偿技术有助于提高人脸检测率。
- 4) 自适应同态对数变换后的图像自然,符合人类视觉习惯。

基于以上优点,自适应变换技术、同态补偿技术和自适应同态对数光照补偿方法对人脸检测和人脸识别系统的应用和研究非常有用,特别是同态补偿技术补偿后的图像比一般方法补偿后的图像清晰很多(包括同态滤波补偿的图像),相信在对图像清晰度要求颇高的人脸识别方面的应用中大有用武之地。但由于基于图像的光照模型是复杂多样的,本文的定义 1、2 仅提供了两种简单的光照标准,需要进一步完善。

参考文献 (References)

[1] Phillips P J, Moon H, Syed A, et al. The FERET evaluation methodology for face-recognition algorithms [J]. IEEE TPAM, 2000, 22(10): 1090-1104.

[2] Govindaraju V, Sher D B, Srihari R K, et al. Locating human faces in newspaper photographs [C] // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego, CA: IEEE Computer Society, 1989: 278-285.

[3] Miao J, Yin B C, Wang K Q, et al. A hierarchical multiscale and multiangle system for human face detection in a complex background using gravity-center template [J]. Pattern Recognition, 1999, 32(6): 1237-1248.

[4] Edelman S, Reisfeld D, Yeshurun Y. A system for face recognition that learns from examples [C] // Proc. of European Conf. Computer Vision. Berlin: Springer-Verlag, 1992: 787-791.

[5] Reisfeld D, Yeshurun Y. Robust detection of facial features by generalized symmetry [C] // Proc. of International Conference on Pattern Recognition. [S. l.]: The Hague Netherlands, 1992: 117-120.

[6] Zheng Qing, Min Fan, Chen Leiting. Facial illumination compensation based on composite transformation [J]. Application Research of Computers, 2008, 25(1): 507-509. [郑庆, 闵帆, 陈雷霆. 基于复合变换的人脸光照补偿方案 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25(1): 507-509.]

[7] Liu Hong, Li Jintao, Miao Jun. Illumination compensation based on multi-method integration in face detection [J]. Journal of System Simulation, 2001, 13(Suppl): 486-489. [刘宏, 李锦涛, 苗军. 多方法融合来解决人脸检测中的光照补偿 [J]. 系统仿真学报, 2001, 13(增利): 486-489.]

- [8] Zhaow, Chellappa R. Illumination-insensitive face recognition using symmetric shape-from-shading[C] // Proc. of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Hilton Head Island; South Carolina University, 2000: 1286-1293.
- [9] Qing Laiyun, Shan Shiguang, Chen Xilin. Face recognition under varying lighting based on the harmonic images [J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(4): 760-768. [卿来云, 山世光, 陈熙霖. 基于球面谐波基图像的任意光照下的人脸识别 [J]. 计算机学报, 2006, 29(4): 760-768.]
- [10] Shan S, Gao W, Cao B, et al. Illumination normalization for robust face recognition against varying lighting conditions [C] // Proceedings of IEEE International Workshop on Analysis and Modeling of Faces and Gestures. New York; IEEE, 2003: 157-164
- [11] Du Bo, Shan Shiguang, Qing Laiyun, et al. Empirical comparisons of several preprocessing methods for illumination insensitive face recognition[C] // Proceedings of IEEE International Conference on the Acoustics, Speech and Signal Processing. New York; IEEE, Philadelphia, 2005, 2: 981-984.
- [12] Wang Hongnan, Zhong Wen, Wang Jing, et al. Research of measurement for digital image definition[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(6): 828-831. [王鸿南, 钟文, 汪静, 等. 图像清晰度评价方法研究 [J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(6): 828-831.]