

空域同态滤波算法研究

肖俊 宋寿鹏 丁丽娟

(江苏大学机械工程学院测控技术与仪器系, 镇江 212013)

摘要 改进空域同态滤波算法, 将图像低通滤波结果反相作为补偿模型来平衡图像的光照非均衡性, 减少低频信息的损失; 对主要影响同态处理速度的空域滤波进行优化, 提出了两种简化计算方法: 基于 Kronecker 积构造 2 维窗的模板分解方法和基于抽样和插值方案的空域滤波近似方法。仿真结果表明, 基于优化计算方案的改进同态滤波快速算法在补偿图像光照非均衡性、降低计算量的同时, 有效地保持了图像低频信息, 且可通过更多滤波模板实现。

关键词 空域同态滤波 模板分解 Kronecker 积 抽样 插值

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)12-2302-05

Research on the Fast Algorithm of Spatial Homomorphic Filtering

XIAO Jun, SONG Shou-peng, DING Li-juan

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract An improved homomorphic spatial filtering algorithm is presented. With the reversed low-frequency image this algorithm compensates imbalanced illuminating in the uneven brightness image in order to reduce the loss of low frequency components. Then two optimum schemes about spatial filtering are proposed for efficient processing: a method of 2D window template decomposition, which is constructed by tensor production and an approximate spatial filtering based on sampling and interpolation. Simulation indicates that the improved algorithm with the two optimum methods enhances illuminating uniformity, reduces the computational load and keeps the low frequency components effectively. Besides, it can be performed by more 2D windows.

Keywords spatial homomorphic filtering, template decomposition, Kronecker product, sampling, interpolation

1 引言

同态滤波是图像预处理中的一种常用算法, 主要用于解决光照非均衡图像的校正问题^[1]。经典同态滤波方法, 由于涉及到 FFT 和 IFFT 计算, 占用运算时间和空间都比较大, 不利于应用在实时性场合, 如基于纹理特征的车牌定位过程^[2]。而现有的基于空域处理的同态滤波算法, 还有改进空间。为此在改进空域同态滤波算法的基础上, 对影响滤波速度的空域滤波计算方法进行优化, 提出了基于 Kronecker 积构造 2 维窗的模板分解空域滤波方法及基于抽样和插值方案的空域滤波近似方法。基于

这两种方法的同态滤波处理在平衡光照非均匀性同时, 适用于更多滤波模板, 且计算量也有所减少。

2 改进空域同态滤波算法

2.1 改进空域同态滤波算法的设计

空域同态滤波的基本方法在文献 [1] 中有论述。其中, 用原图减去低通图像, 强化图像的高频信息, 将过多损失低频信息; 即使乘上入射光常量, 也不能弥补低频有用信息的损失^[2]。目前, 尚无文献对有效选取入射光常量的问题进行进一步研究。

为避免有用低频信息过度损失, 改进空域同态滤波方法如下:

(1) 分离入射分量和反射分量

$$g(x, y) = \ln f(x, y) = \ln i(x, y) + \ln r(x, y) \quad (1)$$

(2) 通过空域 2 维窗实现低通滤波

$$g'(x, y) = LPF(g(x, y)) \approx \ln i(x, y) \quad (2)$$

式中: $LPF(\quad)$ 为低通滤波。

(3) 补偿模型

$$b(x, y) = N - \ln i(x, y) \quad (3)$$

对于灰度图像, N 取 256。

(4) 光照平衡

$$s(x, y) = A \times b(x, y) + B \times g(x, y) \quad (4)$$

A, B 为加权值, 根据需要调整。取 $A = B = 0.5$ 。

得到补偿图像:

$$p(x, y) = e^{s(x, y)} \quad (5)$$

2.2 改进空域同态滤波算法的验证

图 1 为 380×320 像素光照非均匀的车辆图像。由图可见, 汽车顶部光照过强而底部光照过弱, 需采用同态滤波, 补偿光照的非均衡性。

分别采用基于邻域平均迭代及 2 维高斯模板分解^[2]的改进空域同态滤波算法对图像进行光照非均衡补偿。

图 2(a)、(b) 为基于 51×51 邻域平均迭代得到光照补偿模型及补偿图像(为与原图比较, 将补偿图



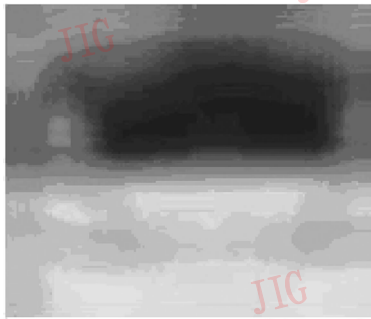
图 1 光照非均衡汽车图像

Fig. 1 An car image under imbalanced illuminations

像进行灰度拉伸)。由图(b)可见, 车辆顶端过强光照及底部的过弱光照在一定程度上得到补偿, 车牌部分及地面砖纹也被强化出来, 且未引起图像失真。

对于任意 $M \times N$ 图像, 采用 $m \times n$ 邻域平均迭代的空域滤波, 在不考虑边缘效应情况下计算量为 $M \times N \times 6$ 次加(减法)和 $M \times N$ 次乘(除法)。

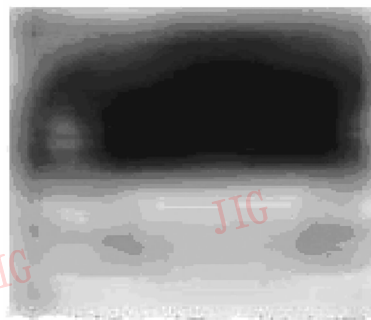
图 2(c)、(d) 为基于 51×51 2 维高斯模板分解得到的光照补偿模型和补偿图像(补偿图像同样采用灰度线性拉伸), 权值取标准正态分布在点 $[-0.625, -0.600, \dots, 0.625]$ 上幅值。由图可见, 该方法也具有较好滤波效果。但是, 卷积的边缘效应, 使图像边缘处过亮、整体过暗。需要改进边缘效应补偿方法。



(a) 邻域平均反相光照模型



(b) 邻域平均补偿图像



(c) 高斯模板分解反相光照模型



(d) 高斯模板分解补偿图像

图 2 改进空域同态滤波效果

Fig. 2 Illuminating uniformity using an improved homomorphic spatial filtering

对于任意 $M \times N$ 图像,采用 $m \times n$ 2 维高斯模板分解滤波,在不考虑边缘效应情况下计算量为 $M \times N \times (m + n - 1)$ 次加(减)法和 $M \times N \times ((m + n) + 1)$ 次乘(除)法。

图 2 说明,改进同态滤波算法对于平衡光照的非均衡性,避免图像失真是有效的。为使该算法在现场快速实现,一是需要扩大空域滤波模板适用类型,二是简化计算过程。因此,对主要影响改进算法运行速度的空域滤波进行优化处理。

3 空域滤波优化

3.1 基于 Kronecker 积构造 2 维窗的空域滤波优化

Kronecker 积是构造 2 维窗的常用方法^[3]。设 2 维窗 $Win(m, n)$ (m, n 为奇数)可由 1 维数组 $G_1(m) = [g_1(1), g_1(2), \dots, g_1(m)]^T$ 、 $G_2(n) = [g_2(1), g_2(2), \dots, g_2(n)]$

通过 Kronecker 积构造:

$$Win(m, n) = G_1(m) \otimes G_2(n) = \begin{bmatrix} g_1(1)g_2(1) & g_1(1)g_2(2) & \dots & g_1(1)g_2(n) \\ g_1(2)g_2(1) & g_1(2)g_2(2) & \dots & g_1(2)g_2(n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_1(m)g_2(1) & g_1(m)g_2(2) & \dots & g_1(m)g_2(n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 维模板 $Win(m, n)$ 对于矩阵 $f(m, n)$ 的加窗处理:

$$\begin{aligned} f'(m, n) &= f(m, n) * Win(m, n) \\ &= \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f(m + j, n + i) Win(j, i) \\ &= \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f(m + j, n + i) g_1(j) g_2(i) \\ &= \sum_{j=1}^m g_1(j) \times [f(x + j, n) * G_2(n)] \\ &= f(m, n) * G_1(m) * G_2(n) \quad (7) \end{aligned}$$

式(7)表明,模板分解法可以推广,即通过 Kronecker 积构造的 2 维窗对图像的平滑可以通过两次 1 维卷积实现。

图 3 是基于 Kronecker 积 2 维窗的空域同态滤波效果图。其中,图 3(a)为基于 2 维矩形窗平滑(也即邻域平均)的同态滤波结果,图 3(b)为基于水平和垂直两个方向均值平滑的同态滤波结果。由于 2 维矩形窗可视为 1 维矩形窗通过 Kronecker 积构造,而数组的 1 维矩形窗的卷积平滑等效于数组均值平滑,所以,根据 Kronecker 积 2 维窗模板可分解性质,二者滤波效果应一致,图 3(a)、(b)仿真结果也表明了这一点。图 3(c)为 2 维 Hanning 窗(1 维 Hanning 窗 Kronecker 积构造)平滑的滤波结果,图 3(d)为 Hanning 窗水平和垂直两个方向平滑的滤



图 3 基于 Kronecker 积构造 2 维窗的空域同态滤波效果

Fig. 3 The enhanced images processed by the improved homomorphic spatial filtering based on 2D windows constructed by tensor production

波结果。由图可见,图 3(c)与图 3(d)基本一致。所以,对于 Kronecker 积构造的 $m \times n$ 2 维窗的滤波过程,是可以简化为两个方向滤波处理的。这样,确定每个像素的计算量由 $m \times n$ 次乘(除)法、 $m \times n - 1$ 次加(减)法减少为 $m + n$ 乘(除)法、 $m + n - 1$ 次加(减)法。

根据 2 维矩形窗可分解性质,可对邻域平均迭代方法进行进一步简化:将任意尺寸 2 维矩形窗的邻域平均分解为两个方向的 1 维矩形窗平滑实现;在 1 维矩形窗平滑过程中,有采用滑窗思想迭代实现。在不考虑边缘效应情况下,对于 $m \times n$ 2 维矩形窗,确定每个像素的计算量为 6 次加(减)法运算和 1 次除法运算减少为 4 次加(减)法运算和 1 次除法运算,计算量略有减少。

2 维高斯窗可由两个 1 维高斯数组通过 Kronecker 积构造出来,所以,高斯窗模板分解方法^[3]可视为 Kronecker 积 2 维窗模板分解法的一个特例。

3.2 基于抽样和插值方案的空域滤波优化

光照补偿模型具有的渐变特性。可借鉴 1 维信号抽样插值理论^[4,5],对获取光照模型的任意加权空域滤波进行简化。

设置图像原数据为 $f(m, n)$,对行数据上进行 $T + 1$ 倍抽取,对列数据进行 $V + 1$ 倍抽取。根据信号理论,该 2 维信号数据频谱在行方向上 $T + 1$ 倍扩展,在列方向上 $V + 1$ 倍扩展;对于原设计 2 维滤波器转折频率点到原点长度为 D_0 时,抽样后待滤波滤波器转折频率点应在行、列方向分别扩大 $T + 1$ 、 $V + 1$ 倍。滤波后,将数据进行插值。一个简易方法是,首先在行列方向上在每两点之间分别补 T 、 V 个零;补零以后,图像的频谱出现映像,需要用一个低通滤波器去除这些映像:从空域里理解,即是用一个低通滤波器对灰度值进行插补;插值后即可构造出图像的光照模型和补偿模型,进而实现图像光照非均衡的补偿。

上述处理过程用到两次低通滤波。利用 Kronecker 积构造 2 维窗的变量可分离特性,可选用 Kronecker 积 2 维窗模板分解方法实现图像低通滤波。而第 2 次的低通滤波(即插值)过程中涉及到很多与零进行乘法运算,采用多相结构去掉不必要计算过程,提高运算速度。

图 4 为一简单插值示意图。其中 \star 表示待插值有效数值点; \circ 和 $*$ 表示插值权值。当插值点恰好为有效点时(此时存在一点 \star 与权值的峰值横坐标重合),假如插值点坐标为 x ,实际需要计算为

$$g'(x) = \sum_{i=1}^4 g(x + 5(i - 2))G(5(i - 2)) \quad (8)$$

当插值点为非有效点时(此时不存在一点 \star 与权值的峰值横坐标重合),假设与有效点偏移 k 点,插值计算为

$$g'(x + k) = \sum_{i=1}^4 g(x + 5(i - 2)) \times G(5(i - 2) - k) \quad (9)$$

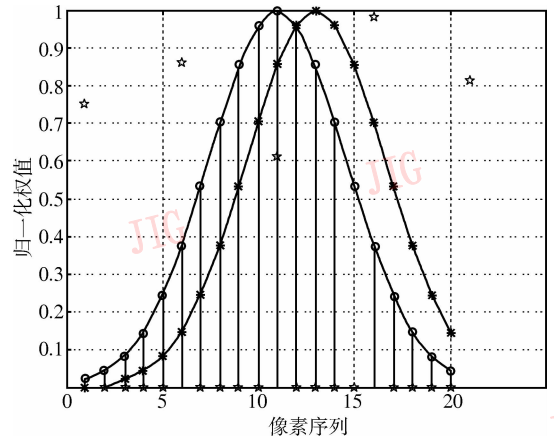


图 4 插值示意图

Fig.4 Interpolation method

这样,与直接卷积计算相比,确定一个数据点,计算量由 20 次乘法和 19 次加法减少为 4 次乘法和 3 次加法,简化了计算过程。

对于整幅图,借鉴多相系统结构,实现插值过程(以水平插值为例):假设滤波后数据水平长度为 L ,垂直长度为 H ,零插值个数为 T ,采用 R 个数据进行内插,插值窗长度为 $R(T + 1) + 1$,插值计算步骤如下:

$$P(kT + 1) = \sum_{i=-R/2}^{R/2} g(i(T + 1))f(k + 1 + i)$$

$$P(kT + 2) = \sum_{i=-R/2}^{R/2} g(i(T + 1) - 1)f(k + 1 + i)$$

.....

$$P(kT + m) = \sum_{i=-R/2}^{R/2} g(i(T + 1) - (m - 1))f(k + 1 + i)$$

.....

$$P(kT + T) = \sum_{i=-R/2}^{R/2} g(i(T + 1) - (T - 1))f(k + 1 + i) \quad (10)$$

垂直插值计算与水平插值类似。确定补偿模型的空域滤波计算量为 $\frac{MN}{(T + 1)^3} \times (m + n) + \frac{MNR(T + 2)}{T + 1}$ 次乘法、 $\frac{MN}{(T + 1)^3} (m + n) - MN + \frac{MN(R - 1)(T + 2)}{T + 1}$

次加法。一般该方法计算量远小于直接卷积计算,略大于模板分解方法。

基于抽样和插值方案的空域同态滤波方法,参数设定为像素抽取数 5 (即 $T = 4$); 第 1 次低通模

板权值标准正态分布 $[-0.625, -0.500, \dots, 0.625]$ 点的幅值; 低通插值取 20 点 1 维高斯窗, 权值取标准正态分布 $[-0.594, -0.528, -0.462, \dots, 0.660]$ 点的幅值。效果如图 5 所示。

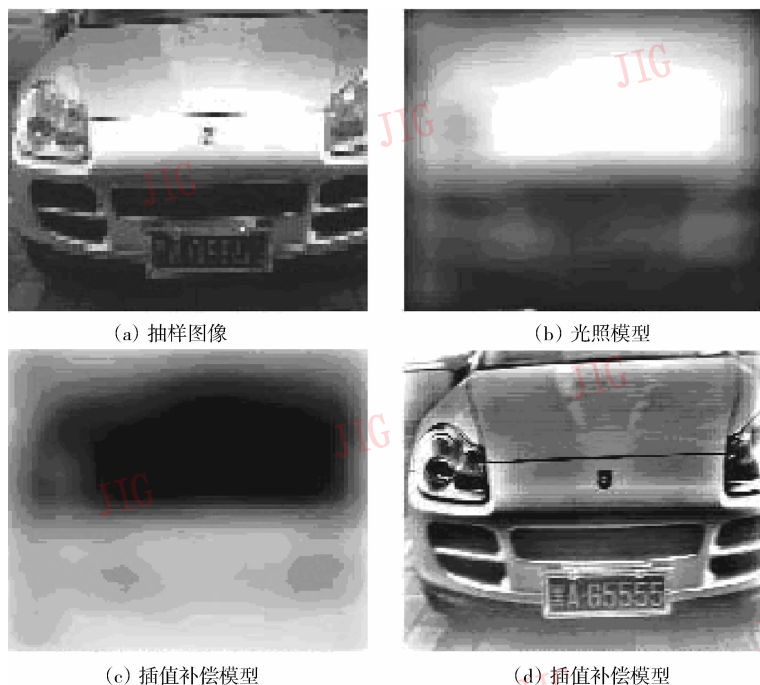


图 5 基于抽样和插值方案同态滤波效果

Fig. 5 The images processed by the improved homomorphic spatial filtering based on sampling and interpolation

插值过程中,插值点取得过少,或者模板边缘权值取得过大,都会导致两个有效像素点在灰度过渡中出现灰度阶跃。

4 结 论

改进了空域同态滤波算法并优化了计算过程。仿真结果表明:

(1)改进的空域同态滤波算法补偿光照的非均衡性、避免图像失真,但是导致图像对比度减小;

(2)基于 Kronecker 积 2 维窗模板分解及基于抽样插值方案的空域滤波方法,有效地简化了计算过程,提高了运行速度;

(3)为提高滤波效果,需对优化计算方案中低通滤波的权值取舍、边缘效应补偿及补偿模型的加权值等问题进行进一步研究。

参考文献 (References)

- Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing [M]. Second Edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 117 ~ 169. [Gonzalez R C, Woods R E. 数字图像处理 [M]. 第二版,北京:电子工业出版社,2003:117 ~ 169.]
- Wen Sha, You Zhi-sheng. A Performance Optimized Algorithm of Spatial Domain Homomorphic Filtering [J]. Application Research of Computers, 2000, 17(3): 62 ~ 65. [闻莎,游志胜.性能优化的同态滤波空域算法[J].计算机应用研究,2000,17(3):62 ~ 65.]
- Zhang Xian-da. Matrix Analysis and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 107 ~ 112. [张贤达.矩阵分析与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:107 ~ 112.]
- Hu Guang-shu. Digital Signal Processing-Theory, Algorithm and Realization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 409 ~ 451. [胡广书.数字信号处理——理论、算法与实现[M].北京:清华大学出版社,2004:409 ~ 451.]
- Hu Guang-shu. Modern Signal Processing Course [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 121 ~ 133. [胡广书.现代信号处理教程[M].北京:清华大学出版社,2004:121 ~ 133.]