

自适应的基于 Gabor 函数的指纹图像增强算法

苑玮琦, 刘兆悦

(沈阳工业大学视觉检测研究所, 辽宁 沈阳 110023)

摘要:针对实际应用时采集的指纹库中指纹图像纹线粗细和质量差别很大的情况,提出了一种根据纹线宽度自适应地决定 Gabor 滤波器变换窗大小的指纹图像增强算法。改进了方向图的算法,在小波变换之后的低频子图上进行方向估算。实验结果表明,基于低频子图计算方向图使得运算速度和结果准确性均有提高,尤其对于低质量的指纹图像因为小波变换滤除噪声的作用,方向图准确性提高更为明显;自适应决定变换窗大小使 Gabor 滤波器能更好地发挥连接断线和分离粘连的作用,处理过粗或过细指纹时更具优越性。

关键词:Gabor 滤波器;指纹图像增强;方向图

中图分类号:TP391

文献标识码:A

Adaptive Fingerprint Enhancement Algorithm Based on Gabor Filter

YUAN Wei-qi, LIU Zhao-yue

(Computer Vision Group, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

Abstract: In fingerprint database collected in daily life there are ridges and valleys whose widths differ much. An adaptive Gabor based fingerprint enhancement algorithm was proposed to adapt images with different texture sizes. The methods for ridge orientation are improved by the processing on the subimage. Experimental results indicate that calculating orientation image by subimage has the speed and veracity advantages which are obvious on low quality images for the noise-reducing function of wavelet transformation. Adaptive Gabor filter works better on thinner or thicker fingerprint textures for its better joint of faulted ridges and separation of accretionary ridges.

Key words: Gabor filter; fingerprint enhancement; orientation image

1 引言

指纹图像增强是 AFIS(自动指纹识别系统)中最为重要的一个环节,这部分算法的优劣将对整个系统产生至关重要的效果。在去除指纹噪声和保持指纹脊线结构的处理方面,带通滤波器因带通特性与人类视觉接收场模型相吻合,而得到大量的应用并且取得较好的效果。Gabor 滤波器作为一种带通滤波器具有频率和方向选择特性,可以增强指纹脊线和谷线之间的对比度,去除脊线间的粘连、孔洞现象,在一定程度上连接断裂的脊线。并且 Gabor 滤

波器还具有另外一个优越性,即满足“不确定性原理”所确定的有效持续时间和有效频率带宽乘积的下限,这意味着 Gabor 滤波器可以同时时在时域和频域获得最佳的局部化。

文献[1]采用 Gabor 滤波器进行指纹图像增强,并对该算法效果进行评测,确立了使用 Gabor 滤波

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60472088)资助。

作者简介:苑玮琦(1960-),男,博士,教授,主要研究领域为生物特征识别。E-mail: yuan60@126.com

收稿日期:2008-01-15

器进行指纹增强的基本框架,但是该算法对于方向图的估算准确度不高;文献[2]采用了基于局部特性的自适应归一化方法,并且使用统计算法计算脊线方向;文献[3]利用二维卷积可分解为两次一维卷积的性质对二维 Gabor 滤波进行改进,从而达到降低计算量的目的,但是增强结果质量有所下降,会出现伪特征;文献[4]使用了小波分解,然后利用 Gabor 滤波器对各子图进行滤波,最后进行小波重构;文献[5]改进了对指纹纹线和频率的提取方法,在归一化图像的基础上利用不同分块大小的方向图互相进行修正,该算法相对于传统方向图算法有很大进步,但是对于低质量指纹图像效果不佳,并且增加了运算量。

以上的算法采用的 Gabor 滤波器变换窗都是固定大小,不能完全适应实际应用中指纹粗细不同的情况。首先为了在提高算法效率的基础上准确表示指纹图库中高噪声指纹图像的方向图,本文对文献[5]的方向图进行改进,提取小波变换之后低频子图的方向信息;其次,为了适应实际应用中不同粗细的指纹图像,在改进 Gabor 滤波器参数的基础上更好的发挥滤波效果,本文采用自适应决定变换窗口大小的 Gabor 滤波器。

2 基于 Gabor 函数的指纹图像增强算法

主要分 3 个步骤:①利用小波变换之后的低频子图求原指纹图像的方向图;②计算原图像纹线频率;③利用方向和频率信息对原图像进行增强。

2.1 利用低频子图估算方向图

2.1.1 归一化处理

指纹图像的归一化处理的目的并不是去除噪声,而是减少脊线或谷线像素点的灰度变化,并且使图像灰度值达到一个预先定义的一个灰度值和方差。设 $I(i, j)$ 为原图像 (i, j) 点的灰度值, M 和 VAR 分别为指纹图像的灰度均值和方差。那么设 $G(i, j)$ 为归一化之后 (i, j) 点的灰度值, M_0 与 V_0 分别是指纹图像灰度均值和方差的期望值。归一化公式^[1]为:

$$G(i, j) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\frac{\delta_0(I(i, j) - M)^2}{\delta}} & I(i, j) > M \\ M_0 - \sqrt{\frac{\delta_0(I(i, j) - M)^2}{\delta}} & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

2.1.2 进行 Haar 小波变换

Gabor 滤波器对方向信息参数十分敏感,因此

计算准确的方向图便显得尤为重要。对于过湿、过干指纹,由于含有大量噪声,直接在原图像上进行方向图的计算效果不甚理想,而小波分解提取出的低频子图抑制了高频扰动对于纹线方向信息的影响,虽然丢失了一些细节点信息,但可以很好地保留有效的方向信息,所以我们采用 Haar 小波抽取出来图像的低频子图信息来估算原指纹图像的方向图。若原指纹图像大小为 $m \times n$,则低频子图大小为 $\frac{m}{2} \times \frac{n}{2}$ 。

2.1.3 计算块方向图

根据文献[5],对于求出的低频子图采用 3 种分块大小,分别为 $W=16, W=8, W=4$,然后根据 $W=16$ 的方向图校正 $W=8$ 的方向图,最后利用同样的方法校正 $W=4$ 的方向图。 $W=4$ 的方向图即为所求。然后把低频子图 4×4 大小的方块对应的方向赋给相对应的原指纹图像 8×8 大小的方块,设 i, j 分别为 $1, 2, 3, \dots$,即把低频子图中第 a_{ij} 块的方向值赋给原指纹图像的第 A_{ij} 块。其示意图如图 1 所示。

A_{11}	A_{12}	A_{13}	$\dots$	A_{1m-2}	A_{1m-1}	A_{1m}
A_{21}	A_{22}	A_{23}	$\dots$	A_{2m-2}	A_{2m-1}	A_{2m}
A_{31}	A_{32}	A_{33}	$\dots$	A_{3m-2}	A_{3m-1}	A_{3m}
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$A_{n2,1}$	$A_{n2,2}$	$A_{n2,3}$	$\dots$	$A_{n2,m-2}$	$A_{n2,m-1}$	$A_{n2,m}$
$A_{n1,1}$	$A_{n1,2}$	$A_{n1,3}$	$\dots$	$A_{n1,m-2}$	$A_{n1,m-1}$	$A_{n1,m}$
A_{n1}	A_{n2}	A_{n3}	$\dots$	$A_{n,m-2}$	$A_{n,m-1}$	$A_{n,m}$

(a) 原指纹图像大小 $m \times n$

a_{11}	a_{12}	a_{13}	$\dots$	a_{1m-2}	a_{1m-1}	a_{1m}
a_{21}	a_{22}	a_{23}	$\dots$	a_{2m-2}	a_{2m-1}	a_{2m}
a_{31}	a_{32}	a_{33}	$\dots$	a_{3m-2}	a_{3m-1}	a_{3m}
$a_{n2,1}$	$a_{n2,2}$	$a_{n2,3}$	$\dots$	$a_{n2,m-2}$	$a_{n2,m-1}$	$a_{n2,m}$
$a_{n1,1}$	$a_{n1,2}$	$a_{n1,3}$	$\dots$	$a_{n1,m-2}$	$a_{n1,m-1}$	$a_{n1,m}$
a_{n1}	a_{n2}	a_{n3}	$\dots$	$a_{n,m-2}$	$a_{n,m-1}$	$a_{n,m}$

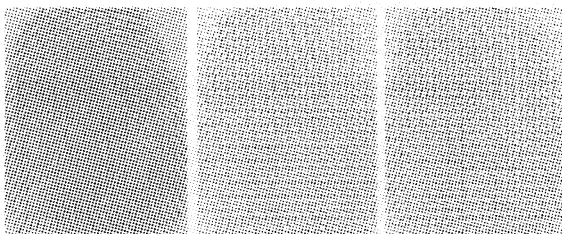
(b) 低频子图大小 $\frac{m}{2} \times \frac{n}{2}$

图 1 原指纹图像和低频子图的对应方向块

对于有旋的指纹,即指纹方向变化急剧的位置,方向图会出现尖点^[6],为解决这个问题,对于 $m \times n$ 的图像再进行以下步骤的判断(d_i 为第 i 块的方向值):

- (1) 初始 $i = 1$;
- (2) 若 $i = n - 3$, 则该块的修改结束, 返回;
- (3) i^{++} , 若 $\text{sgn}(d_i) = \text{sgn}(d_{i+1})$ 并且 $\text{sgn}(d_{i+1}) \neq \text{sgn}(d_{i+2})$, 修改 $d_{i+1}, d_{i+1} = 0$, 然后返回到(2)。

通过以上操作, 便可以得到符合指纹脊线结构的方向图。图 2(b) 在处理噪声多的湿指纹图像图 2(a) 时在脊线粘连严重处出现错误的环型方向图, 而采用本文的算法则在消除错误的同时还平滑了一部分尖点。证明本文所采用的利用低频子图估算方向图的方法确实可以克服低质量指纹图像的噪声干扰, 从而克服 Gabor 滤波器对于方向图的敏感性。



(a) 原指纹图 1 (b) 文献[3]算法方向图 (c) 本文算法方向图
图 2 两种算法的方向图比较

2.2 计算指纹脊线频率

Lin Hong 的经典脊线频率估算方法现在被广泛采用, 把原指纹图像等分为 $w \times w$ 的频率块窗口, 然后再在垂直于脊线的方向上取 $l \times k$ 的矩形窗口并且在此方向上进行灰度投影, 便有 l 个沿着脊线方向 K 个像素点的灰度值累加值, 其要求在图像质量较好的情况下, 脊线谷线的累加值可呈现离散正弦波形。该算法认为波峰与波峰之间的距离就是脊线之间的距离, 而脊线频率即为脊线距离的倒数。我们在实验中令 $w = 8, l = 32, k = 8$, 对于 500dpi 的指纹图像, 低噪声的指纹脊线频率范围为 $\left[\frac{1}{3}, \frac{1}{25}\right]$, 我们在实验中针对 FVC2004 图库各种质量的指纹图片在以下几个步骤中对脊线频率进行修正:

- 1) 求出灰度投影的峰值之后进行中值滤波, 然后初步计算出频率值为峰值之间平均距离的倒数^[1];

- 2) 对于求出的频率值若不在标准范围之内便进行标记, 对标记的频率块进行 Gaussian 滤波。滤波器模板如图 3 所示;

- 3) 对用 Gaussian 滤波器滤波之后的频率值进

行低通滤波, 即使用带阈值的邻域平均法。取 7×7 滤波窗口内所有点的平均值, 当窗内每点频率值与均值差大于域值 φ 时, 用平均值代替该点频率值, 这里 $\varphi = 0.005$ 。

1	2	5	7	5	2	1
2	4	10	14	10	4	2
5	10	25	35	25	10	5
7	14	35	49	35	14	7
5	10	25	35	25	10	5
2	4	10	14	10	4	2
1	2	5	7	5	2	1

图 3 Gaussian 滤波器的模板

2.3 Gabor 滤波器的设计

使用 Gabor 滤波器进行滤波, (f, σ_g, θ) 三个参数选取的好坏决定其性能。公式(2)是我们采用的偶对称 Gabor 滤波器的一般形式, 其中高斯包络常量 $\sigma_x = \sigma_y = 4$, θ 是 Gabor 滤波器的方向, f 是正弦平面波的频率。

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x_1^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_1^2}{\sigma_y^2}\right)\right) \cdot \cos(2\pi f x_1) \quad (2)$$

其中, $x_1 = x \cos \theta + y \sin \theta; y_1 = -x \sin \theta + y \cos \theta$ 。

以前利用 Gabor 滤波器与图像进行卷积运算的时候在原指纹图像上所采取的变换窗大小都是固定的, 卷积公式见公式(3), $R(i, j)$ 为掩模值, 变换窗大小为 $w_1 \times w_1$ 。

$$E(i, j) = \begin{cases} 255 & R(i, j) = 0 \\ \sum_{u=-\frac{w_1}{2}}^{\frac{w_1}{2}} \sum_{v=-\frac{w_1}{2}}^{\frac{w_1}{2}} g(u, v; O(i, j), f(i, j)) \times G(i - u, j - v) & R(i, j) \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

若想达到理想的滤波效果 w_1 大小应为一个指纹线宽度, 而不同人指纹纹线宽度差异很大, 男人与女人的纹线粗细不同, 大人与小孩的纹线粗细不同。当变换窗口大小相对于纹线宽度过小的时候, 当两个断点之间的距离相对比较大时, 滤波器连接断线的作用较弱, 处理效果不理想, 如图 4(b) 所示; 相反, 变换窗口相对过大时, 则有可能将端点错误滤波成分叉点, 影响识别率, 如图 4(d) 所示(方框标记处为伪分叉点)。

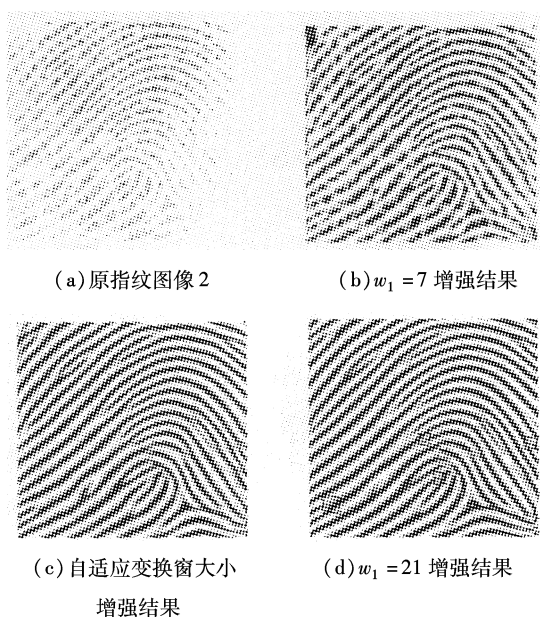


图4 变换窗口的大小对滤波结果的影响

为解决以上问题,本文提出一种采用自适应决定变换窗大小的 Gabor 滤波器。首先需要计算出一幅指纹图像脊线与谷线宽度和。以前提出的求纹线宽度算法需要另外开辟一块内存空间存储二值化指纹图像并且进行八方向逐点遍历累加等操作^[6],影响整个系统的运行速度,这里我们利用已求得的频率值进行计算。对于 500dpi 的指纹图像,Lin Hong 指出指纹脊线的频率范围为 $\left[\frac{1}{3}, \frac{1}{25}\right]$,而同一幅指纹的频率 f 变化不大。第 2.1.2 小节中已经求得 $m \times n$ 的图像中每个 8×8 的块的频率 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_p$, p 代表图像中频率块的个数,用平均的块频率值代表图像的频率值,即 $f = (f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_p) / p$ 。滤波器波长 λ 与频率 f 的对应关系为 $\lambda = 1/f$,已求频率均值的倒数即为所求的滤波器的波长,即 Gabor 滤波器的变换窗的大小 $w_1 = 1/f$ 。

3 实验结果及分析

实验在 Windows XP 操作系统, Visual C++ 6.0 的软件环境条件下,针对 FVC2004 指纹库进行。实验结果如图 5、图 6 和表 1 所示。

图 5 两幅图片的原图像是图 2(a),实验结果表明利用小波变换后的低频子图提取方向图克服了低质量指纹图像的噪声干扰,准确性大大提高,从而得出准确的增强结果,同时也进一步证实了 Gabor 滤波器对于方向图的敏感性;由于本文在原图像 $1/4$ 大小的低频子图上进行方向图估算,所以时间性能

得到了优化,如表 1 所示;从图 6 可以看出在参数设置相同的情况下,纹线粗细与平均纹线宽度值相差较大的指纹图像采用自适应 Gabor 滤波器滤波效果明显提高。

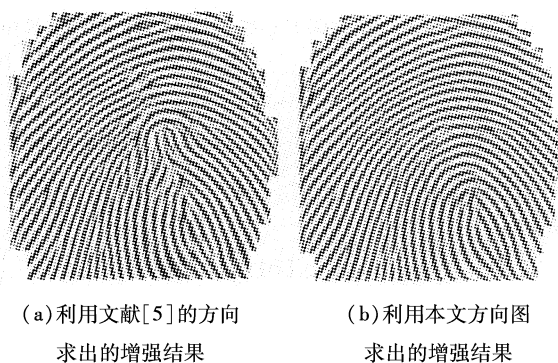


图5 原指纹图像1采用不同方向图得出的增强结果

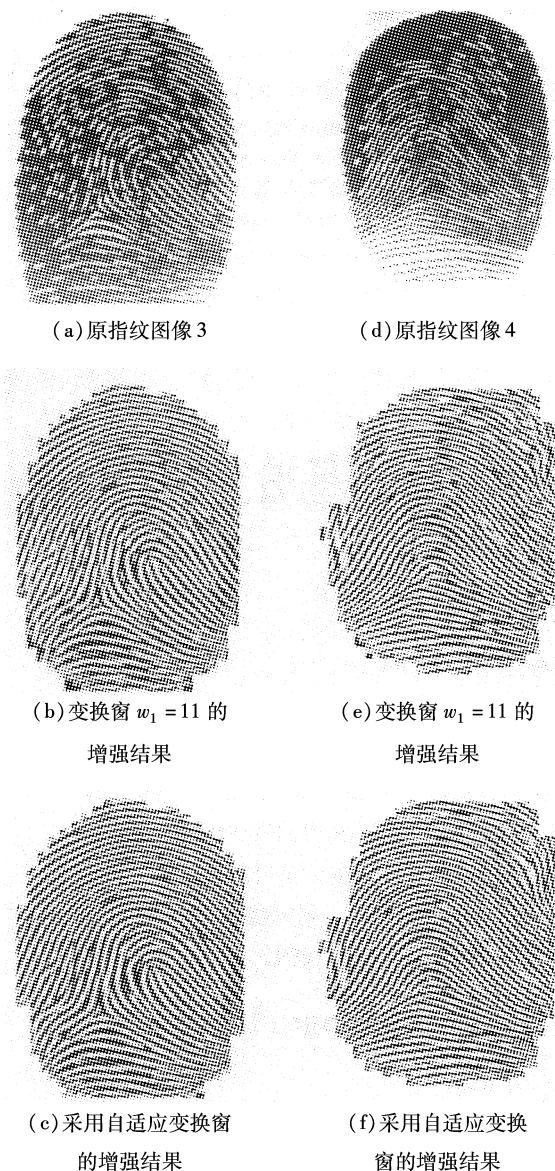


图6 采用自适应变换窗与传统算法比较

表1 两种方法所用时间对比

方法	文献[5] Gabor 处理/s	本文 Gabor 处理/s	速度提高 百分比/%
方向图计算 时间	0.590 ~ 0.640	0.365 ~ 0.395	35.5
Gabor 增强 时间	2.185 ~ 2.290	1.828 ~ 1.859	16.7

4 结 论

本文研究了利用 Gabor 滤波器进行指纹图像增强的方法,在文献[5]的基础上改进了方向图的求法,不仅提高了方向估算的准确性而且提高了系统运算速度;利用频率均值求出自适应 Gabor 滤波器变换窗口的大小,精确选择纹理范围,可以更好发挥 Gabor 滤波器频率选择和方向选择的特性,更彻底地分离粘连的脊线或者连接断裂的脊线。对于实际应用中采集指纹图像质量不同,纹线粗细存在很大差异的指纹库来说,本文算法更具优越性。

(上接第 843 页)

为 0.05 下,像移测量误差的均方差不大于 0.12 个像元,完全满足空间相机的使用要求。并且,该方法还具有操作简单、运算速度快的优点,较为适合空间相机的在轨使用。近年来,随着 SLM 和 CCD 等光电器件制作工艺和技术的不断提高,目前已经出现了每秒几千帧的高频空间光调制器和高速 CCD 相机,这些器件的出现可以实现实时联合变换相关。在测得随机像移后,可将相机采集到的变形图像和像移测量值同时传回地面,然后,使用线性插值的方法根据像移量对变形图像进行补偿和恢复。这种补偿方法的计算量小、精度高、图像过渡平滑,可获得高质量的高分辨率卫星图像。并且使用软件在地面实施像移补偿,还可以有效减轻卫星的质量和功耗,降低稳像系统的设计难度。本研究为解决高分辨率空间相机的实时稳像问题提供了有益的探索和工程参考。

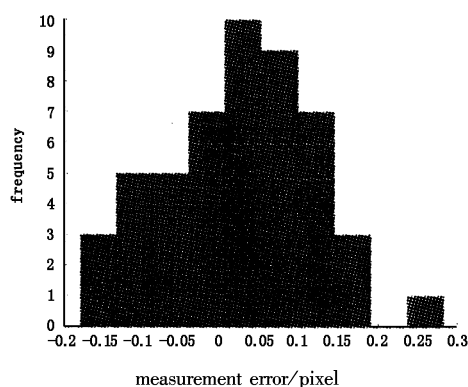


图5 测量误差的直方图

参考文献:

- [1] Lin Hong, Jian A, Pankanti S, et al. R. Fingerprint enhancement, applications of computer vision [C]//Wacv 96, Proceedings 3rd IEEE Workshop on, 1996; 202 - 207.
- [2] Kim B G, Kim H J, Park D J. New enhancement algorithm for fingerprint images [C]//Proc 16th International Conference Pattern Recognition, 2002, 3: 879 - 882.
- [3] Vutipong AreekuI, Ukrit Watchareeruetal. Fast separable gabor filter for finterprint enhancement [C]//ICBA LNCS 3072, 2004, 403 - 409.
- [4] Weipeng Zhang, Yuan Yan Tang, Xing You. Fingerprint enhancement using wavelet transform combined with Gabor filter [J]. Internaqtional Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2004, 18(8): 1391 - 1406.
- [5] 刘军波, 马利庄, 聂栋栋, 等. 改进的基于 Gabor 滤波器的指纹增强算法 [J]. 计算机工程, 2005, 31(15): 146 - 147, 164.
- [6] 苑玮琦, 郑潇. 基于连续方向图的指纹图像滤波 [J]. 激光与红外, 2006, 36(3): 718 - 721.

参考文献:

- [1] 樊超, 李英才, 易红伟. 偏流角对 TDICCD 相机像质的影响分析 [J]. 光电工程, 2007, 34(9): 70 - 73.
- [2] 佟首峰, 李德志, 郝志航. 高分辨率 TDI - CCD 遥感相机的特性分析 [J]. 光电工程, 2001, 28(4): 64 - 67.
- [3] 刘明, 刘刚, 李友一, 等. 航天相机像移计算及补偿分析 [J]. 光电工程, 2004, 31(增刊): 12 - 14.
- [4] Sylvie R, Loic J, Bernard R, et al. Satellite attitude Instability effects on stereo images [J]. IEEE, 2004, 9(4): 477 - 480.
- [5] Bonshtdt B E, Eskov D N, Smirnov A J. Optoelectronic sensing of image movement in focal plane of earth surveillance optical system [J]. Proceeding of SPIE, 1994, 2221: 128 - 133.
- [6] Leitmann M G, Gomes N M, Rebordao J M, et al. Modem space guidance, control and tracking for small LEO satellites [J]. Proceeding of SPIE, 1994, 2221: 79 - 86.
- [7] Lee S, Alexander J W, Jeganathan M. Pointing and tracking subsystem design for optical communications link between the international space station and ground [J], Proceeding of SPIE, 2000, 3932: 150 - 157.
- [8] Valerij T, Sergei D, Klaus J, et al. Smart-scan hardware test results for smart optoelectronic image correction for pushbroom cameras [J]. Proceeding of SPIE, 2002, 4814: 264 - 272.
- [9] Wong H S, Yao Y L, Schlig E S. Tai charge-coupled Devices; Design and Application [J]. IBM Journal of research and development, 1992, 36(1): 83 - 105.