

文章编号: 0253-2239(2005)04-485-6

多路 CCD 成像非一致性动态校正新方法

郑东耀 丁天怀

(清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 在多路 CCD 成像结构中, 由于影响各路成像参量不一致的因素较多, 常规校正方法变得复杂和困难。在分析多路 CCD 成像机理的基础上, 提出了一种利用小波变换的多路 CCD 成像非一致性动态校正新方法, 即在分析同一目标成像中各路图像像元特性差异的基础上, 利用小波变换构筑校正因子对后续的 CCD 捕获图像进行校正。为满足实时校正的需要, 研究了动态条件下成像校正的时效性, 分析了不同小波的动态校正效率。实验结果表明, 校正后同一目标各路图像相关值为 0.9975, Symlet3 小波在两路及多路成像校正中均具有较高效率; 在多路成像中, Symlet 系列小波相对于其它类型小波校正效率相对突出。此方法为多路 CCD 成像非一致性在线校正提供了有效的途径。

关键词: 成像系统; 多路 CCD 成像; 非一致性校正; 小波变换; 校正效率评估

中图分类号: TN818 文献标识码: A

A Novel Method for Dynamic Calibrating Non-Uniform of Multiple CCD Imaging

Jia Dongyao Ding Tianhuai

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: The conventional methods for calibrating non-uniform of multiple charge coupled device (CCD) imaging are difficult and complex because of so many factors leading to imaging non-uniform in a multiple CCD imaging system. Based on analyzing imaging mechanism of multiple CCD, a novel calibration method for multiple CCD imaging using wavelet analysis was proposed. The calibration coefficient was constructed using wavelet transform for calibrating the images captured by different CCD after analyzing the pixel characteristic discrimination of different images. The dynamic calibration efficiency of different wavelets was also discussed in the real-time imaging calibration processing. The result indicated that the correlation value of the images of the same object captured by different CCD was 0.9975 after the calibration. Symlet3 wavelet was more effective than other wavelets both in the two CCD imaging and multiple CCD imaging calibrating. And also it indicated that Symlet serial wavelets were more effective in calibrating the non-uniform of multiple CCD imaging than other types of wavelet. This method provided an effective way for on-line calibrating the multiple CCD imaging system in practical application.

Key words: imaging system; multiple CCD imaging; non-uniform calibration; wavelet transform; calibration efficiency evaluation

1 引 言

近几年来, 由于高分辨率、超宽幅面检测现场的需要, 采用多 CCD 的成像结构形式得到更广泛的应用^[1,2], 这种成像结构在提高空间分辨率, 扩展动态范围、采集多维信息等方面具有明显的优势。然而, 由于 CCD 之间的灵敏度、线性、光谱特性, 成像物

距、光照度, 甚至外电源、环境温度等影响, 各路 CCD 成像系统的成像参量存在差别, 使相同条件下获取的同一目标图像中会产生色泽、纹理、形态等特征的细微畸变, 为后续的图像拼接带来不便。这种成像不一致性是成像系统固有的特性, 也是目前多路 CCD 成像应用中面临的主要问题。为此, 一些研

作者简介: 郑东耀(1974~), 男, 清华大学精密仪器系博士研究生, 主要从事光学成像技术、图像识别方面的研究。

E-mail: jdy02@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2004-06-08; 收到修改稿日期: 2004-10-09

究者试图找到解决成像参量不一致的方案^[3~10]。但由于多路成像很难同时兼顾灵敏度、线性、光谱特性、几何畸变等非一致性因素的影响,提出的方法只局限于对局部成像环节的校正^[11],其它环节的失真依然存在,因此很难找到一种通用的方法对成像过程中多个环节有效校正。

在获取的图像中,CCD 之间的不一致表现为同一条件下同一目标图像之间的差别,而图像的差别归结到对应像元的不一致性。因此,解决这个问题在很大程度上取决于对像元不一致性的分析。事实上,像元不一致性主要影响的是图像细节分辨率(如纹理、形态、颜色等差别)。若在同一成像条件下分析不同 CCD 获取图像的差别,利用图像处理对成像参量非一致性进行后续补偿,则各路 CCD 成像差异得到校正。为此,提出了利用小波变换的多路 CCD 成像非一致性校正方法。

2 多 CCD 成像及其校正机理

在多 CCD 成像结构中,若成像的视场宽度为 D ,单个线阵 CCD 行扫描像素个数为 n ,视场分辨率为 α ,则需要 CCD 个数 N 表示如下:

$$N = \frac{D}{\alpha \cdot n}. \quad (1)$$

多 CCD 扫描要求各 CCD 相机成像参量严格一致,否则,同一目标经不同 CCD 成像会产生色泽及形状畸变,这些细微畸变影响后续的特征提取。最近几年,小波分析在图像消噪、图像融合、及目标提取中得到广泛应用^[12~14],这种具有“数字显微镜”之称的小波变换也是校正细微畸变的一种较好办法。在原始图像的小波分解中,被分解后的系数同样包含着原始图像中各种轮廓和细节信息。利用小波域的系数校正,可以较好地恢复原图像中细节分量的畸变。

利用小波变换的基本思路是:在基本相同的光学成像条件下(统一 CCD 相机型号,成像物距,镜头,光照环境)分别在各路 CCD 成像系统中获取同一目标的 N 幅图像。对获取的图像分别进行小波分解,进行均值化处理产生一个加权均值小波系数,再利用加权均值小波系数与原 N 个小波系数分别进行代数运算,产生 N 个小波校正系数存入计算机中。多路 CCD 成像系统再次获得新图像后,经小波校正系数校正后产生新的小波系数,利用新的小波系数重建图像即可得到校正后的 N 幅图像,其原理

框图如图 1 所示。

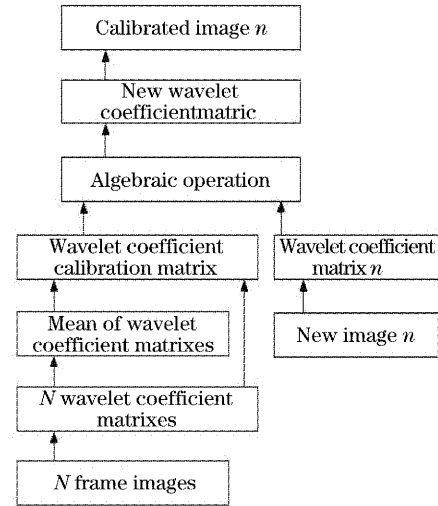


图 1 多路成像小波校正框图

Fig. 1 The block diagram of multipath imaging calibration

3 基于小波变换的校正模型

在基本相同的光学成像条件下获得同一物体的 N 幅图像 $I_1(x, y), I_2(x, y), \dots, I_N(x, y)$, 然后对 N 幅图像分别进行小波变换,分别得到各自的小波系数,转化为 N 个小波系数矩阵: $W_{I_1}, W_{I_2}, \dots, W_{I_N}$, 其中,

$$\begin{cases} W_{I_1} = \langle I_1(x, y), \psi_{a,b} \rangle, \\ W_{I_2} = \langle I_2(x, y), \psi_{a,b} \rangle, \\ \dots \\ W_{I_N} = \langle I_N(x, y), \psi_{a,b} \rangle. \end{cases} \quad (2)$$

将 N 个小波系数矩阵利用求加权均值函数 F 求得加权均值矩阵:

$$W_I = F(W_{I_1}, W_{I_2}, \dots, W_{I_N}), \quad (3)$$

W_I 中每个元素 W 由 N 个小波系数矩阵中对应的 N 个元素 w_i 运算而得:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i w_i}{\sum_{i=1}^N \rho_i}, \quad (4)$$

权值 ρ_i 定义为 $\rho_i = 1 - \frac{|w_i - \bar{w}|}{\bar{w}}$, 既元素 w_i 偏离其算术平均值的程度作为权值。

其中 $\bar{w} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i$, w_i 为 N 个小波系数矩阵中对应的 N 个元素。

由此得到 N 个 CCD 成像通道的校正系数矩阵 K_1, K_2, \dots, K_N 如下式表示:

$$\begin{cases} \mathbf{K}_1 = \mathbf{W}_I / \mathbf{W}_{I_1}, \\ \mathbf{K}_2 = \mathbf{W}_I / \mathbf{W}_{I_2}, \\ \dots, \\ \mathbf{K}_N = \mathbf{W}_I / \mathbf{W}_{I_N}, \end{cases} \quad (5)$$

把所得到的 N 个校正系数矩阵存入计算机中, 为各成像通道校正提供校正因子。

在 N 路 CCD 新捕获的图像 $I'_1(x, y)$, $I'_2(x, y), \dots, I'_N(x, y)$ 中, 进行小波分解又得到 N 个小波系数矩阵, 再把小波系数矩阵与校正系数矩阵相乘, 得到校正后的小波系数:

$$\begin{cases} \mathbf{W}_{I'_1} = \mathbf{K}_1 \times \langle I'_1(x, y), \psi_{a,b} \rangle, \\ \mathbf{W}_{I'_2} = \mathbf{K}_2 \times \langle I'_2(x, y), \psi_{a,b} \rangle, \\ \dots\dots \\ \mathbf{W}_{I'_N} = \mathbf{K}_N \times \langle I'_N(x, y), \psi_{a,b} \rangle, \end{cases} \quad (6)$$

利用小波系数 $\mathbf{W}_{I'_1}, \mathbf{W}_{I'_2}, \dots, \mathbf{W}_{I'_N}$ 重建图像, 可得到校正后的 N 通道新图像 $I''_1, I''_2, \dots, I''_N$ 。即

$$\begin{cases} I''_1 = f(\mathbf{W}_{I'_1}, \varphi_{a,b}), \\ I''_2 = f(\mathbf{W}_{I'_2}, \varphi_{a,b}), \\ \dots\dots \\ I''_N = f(\mathbf{W}_{I'_N}, \varphi_{a,b}), \end{cases} \quad (7)$$

其中 f 为小波逆变换函数。

4 实验结果

4.1 静态条件下两路 CCD 成像非一致性校正

为简便起见, 我们举例说明两路 CCD 成像的情况。在基本相同的光学成像条件下(统一 CCD 相机型号、成像物距、镜头、光照环境等)分别获取同一物体的两幅图像。如图 2 所示, 图 2(a)为第一路 CCD 获取的图像, 定义图像 A。图 2(b)为第二路 CCD 获取的图像, 定义图像 B。

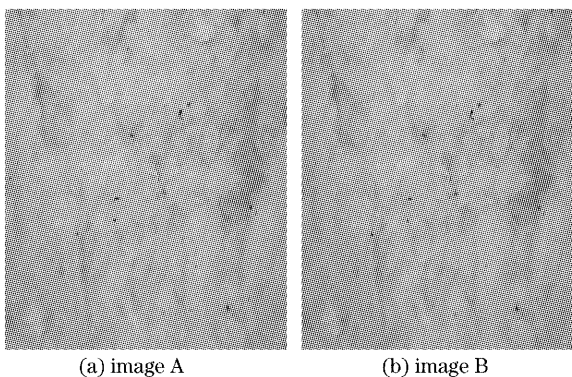


图 2 相同条件下两路 CCD 获取的不同图像

Fig. 2 The different images captured by two paths CCD in the same condition

图 2 中, 很难在视觉上判断两幅图像的差别, 然而计算其相关系数为 0.8572, 说明存在细微的差别。观察两幅图像中第 100 行 1~700 列中像元灰度值分布情况, 如下图 3。其中, 图 3(a)为图像 A 中第 100 行 1~700 列像元灰度值分布, 图 3(b)为图像 B 中第 100 行 1~700 列像元灰度值分布。

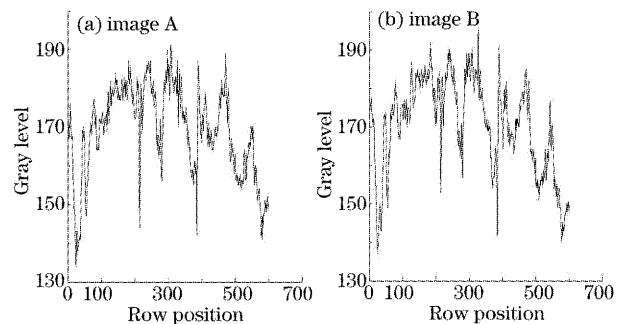


图 3 图像 A, B 中第 100 行 1~700 列像元灰度值分布

Fig. 3 Local gray level distribution of row from 1 to 700, line 100 of two images

图像 A, B 中对应像元灰度相关值为 0.8624。从图 3 中可以看出其像元灰度值的分布略有差别, 如在 200 列附近及 500 列附近两幅图像中像元的灰度值分布是不同的。

对图像 A 和图像 B 进行两层小波分解, 经计算得到小波系数校正矩阵。把两个系数校正矩阵中的小波校正系数(共 412884 个)排成一维数组, 观察校正系数分布状况, 如图 4 所示。图 4(a)为图像 A 的小波校正系数。图 4(b)为图像 B 的小波校正系数。

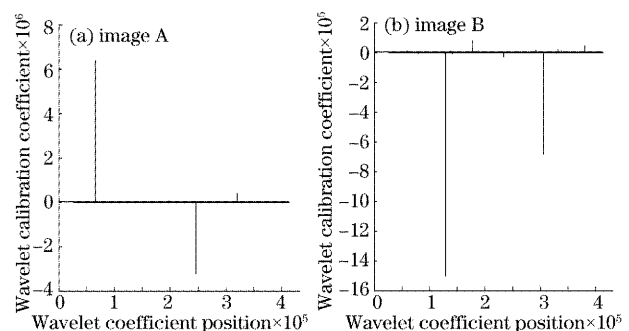
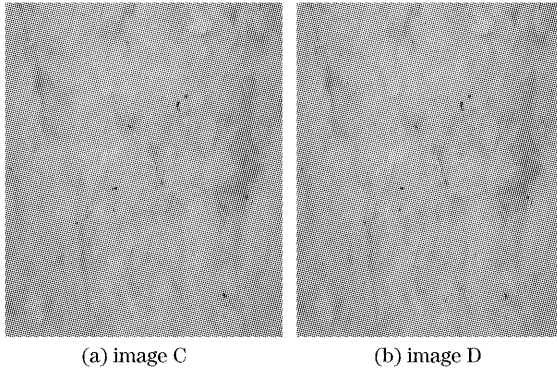


图 4 图像 A, B 中小波校正系数

Fig. 4 The wavelet calibration coefficient of images A and image B

从图 4 中可以看出在哪些点小波校正系数幅值较大, 这些点为畸变点。利用小波校正系数对图像 A, B 进行校正, 经过校正后的图像如图 5 所示。其中, 图 5(a)为图像 A 校正后的图像, 定义图像 C。图 5(b)为图像 B 校正后的图像, 定义图像 D。

经计算, 图像 C, D 的相关系数为 0.9975。但仍



(a) image C (b) image D

图 5 经小波变换校正后的 2 幅图像

Fig. 5 The two images calibrated by wavelet transformed method

很难在视觉上判断两幅图像校正后有什么改进。我们同样观察校正后的图像 C,D 中第 100 行 1~700 列像元灰度值分布情况,如图 6 所示。

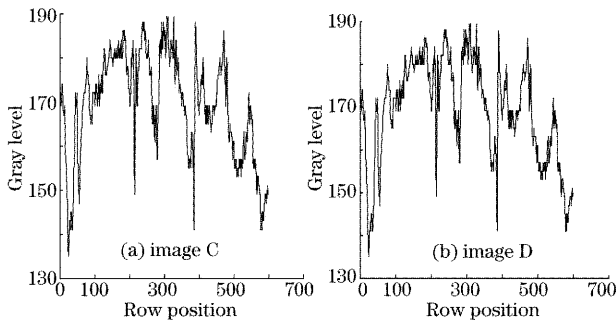


图 6 图像 C,D 中第 100 行 1~700 列像元灰度值分布

Fig. 6 Local gray level distribution of row from 1 to 700, line 100 of two images

其中,图 6(a)为图像 C 中第 100 行 1~700 列像元灰度值分布情况,图 6(b)为图像 D 中第 100 行 1~700 列像元灰度值分布情况。

对应像元灰度相关值为 0.9934。从图 6 中可以看出,其像元灰度值的分布趋于相同,两幅图像相关性有明显的改进。

4.2 两路 CCD 成像非一致性动态校正效率评估

用不同阶次的 Daubechies、Symlet、Coiflet 及 Haar 小波进行了实验。定义动态校正效率

$$\eta = C/T, \quad (8)$$

其中 C 代表校正后的图像相关值, T 代表小波运算耗时,结果如表 1 所示。

结果发现 Daubechies3 和 Symlet3 小波相对于其它小波具有较好的动态校正效率。因此,采用这两种小波用于现场动态校正是可行的。

若定义横坐标为小波序号,纵坐标为校正效率。其动态校正效率曲线如图 7 所示。

表 1 不同小波的动态校正效率比较

Table 1 The comparison of different wavelet dynamic calibration efficiency

Serial number	Wavelet name	C	T / ms	h
1	Haar	overflow	1.750	0.0000
2	Daubechies2	0.3180	3.522	90.20
3	Daubechies3	0.9625	6.016	160.00
4	Daubechies4	0.3460	7.836	44.10
5	Daubechies5	0.9625	10.378	92.70
6	Daubechies6	0.3490	12.246	28.40
7	Daubechies7	1.0000	14.836	67.40
8	Daubechies8	1.0000	16.752	59.70
9	Daubechies9	1.0000	19.390	51.60
10	Daubechies10	1.0000	21.354	46.80
11	Symlet2	0.3180	3.522	90.20
12	Symlet3	0.9625	6.016	160.00
13	Symlet4	0.9625	7.836	122.80
14	Symlet5	0.9625	10.378	92.70
15	Symlet6	0.9625	12.246	78.60
16	Symlet7	1.0000	14.836	67.40
17	Symlet8	1.0000	16.752	59.70
18	Coiflet1	0.4837	6.016	80.40
19	Coiflet2	0.9625	12.246	78.60
20	Coiflet3	1.0000	19.390	51.60
21	Coiflet4	1.0000	26.052	38.30
22	Coiflet5	1.0000	33.628	29.70

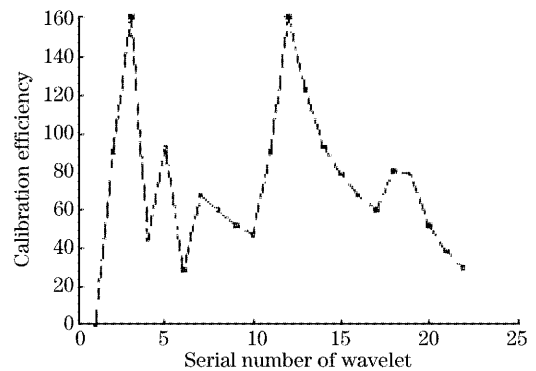


图 7 不同小波的 2 路成像动态校正效率比较

Fig. 7 The comparison of dynamic calibration efficiency of different wavelets in two paths imaging

在图 7 中,由于各小波系数的数据结构有差异,不同小波在两路 CCD 成像中的动态校正效率是不一样的。为此,要充分考虑不同小波变换方法的实效性,而针对两路 CCD 成像校正中, Daubechies3(3 号)和 Symlet3(12 号)小波具有较好的动态校正效率。

4.3 多路 CCD 成像非一致性的动态校正

多路 CCD 成像非一致性校正是两路成像校正的延伸,其校正原理与两路成像校正基本相同,只不

过针对 N 路 CCD 成像通道具有 N 个校正系数而非 2 个。多路成像校正包括以下几个步骤:

1) 利用前述的(5)式计算 N 个 CCD 成像通道的校正系数矩阵 $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \dots, \mathbf{K}_N$, 作为每路 CCD 成像的校正因子。

2) 将 N 路 CCD 成像通道新获取的图像分别进行小波分解, 得到各路图像的小波系数矩阵。

3) 利用前述的(6)式将 N 路 CCD 成像校正因子与对应的小波系数矩阵相乘, 得到 N 路新小波系数矩阵。

4) 利用前述的(7)式对 N 路新小波系数矩阵分别进行逆变换, 即可得到 N 路校正后的图像。

4.3 多路 CCD 成像非一致性动态校正效率评估

多路 CCD 成像动态校正效率评估较之两路的情况要复杂, 主要与三个因素有关。

在 N 路校正图像中, N 幅图像两两相关值的乘积越大, 说明图像一致性较好, 校正效率越高, 如下式表示:

$$\eta \propto \prod_{\substack{i=1, j=1 \\ i \neq j}}^{i=N, j=N} C_{I_i, I_j}, \quad (9)$$

其中 C_{I_i, I_j} 表示 N 路图像中其中两幅图像 I_i, I_j 相关值。

在 N 路校正图像中, N 幅图像对应像素值的方差的平均值越小, 说明图像之间的差异越小, 校正效率越高, 如下式表示:

$$\eta \propto 1 / \left(\frac{1}{X \cdot Y} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sigma_{x,y}^2 \right), \quad (10)$$

其中 $\sigma_{x,y}^2$ 为多幅 $X \cdot Y$ 像素图像中对应点 (x, y) 的像素值的方差。

另外, 动态校正的时间越短, 则校正效率越高, 因此建立的 N 路 CCD 成像校正函数如下式所示:

$$\eta = \prod_{\substack{i=1, j=1 \\ i \neq j}}^{i=N, j=N} C_{I_i, I_j} / \left(\frac{1}{X \cdot Y} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sigma_{x,y}^2 \cdot T \right). \quad (11)$$

同样, 以不同阶次的 Daubechies、Symlet 及 Coiflet 小波对 6 路的情况进行了实验。结果如图 8 所示, 可以看出, 图 8 结论与图 7 所示的两路成像校正效率略有区别。说明不同小波在多路及两路成像校正效率存在差异。在多路成像中 Symlet3(12 号) 校之 Daubechies3(3 号) 小波具有更明显的动态校正效率。而且从整体上讲, Symlet 序列小波具有较好的校正效率。

另外需要说明的是, 在多路成像一致性的实验当中, 光学镜头的非一致性也是影响多路成像效果

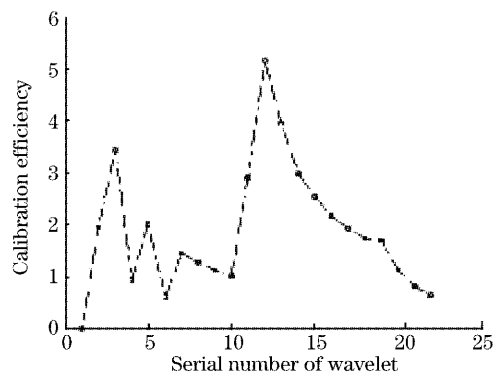


图 8 不同小波的多路成像动态校正效率比较

Fig. 8 The comparison of dynamic calibration efficiency of different wavelets in multipath imaging

的重要因素。为此, 在调节各镜头通光亮刻度一致时, 对最大视场下的畸变进行标定, 然后依据成像相关度标准选择一致性好的光学镜头, 最后将 CCD 与镜头作为整体系统, 对其成像结果进行非一致性分析。

5 结 论

针对多路 CCD 成像结构的复杂情况, 建立了利用小波变换的多路成像非一致性校正模型。针对在线校正情况, 分析了不同小波校正时效性, 用实验证明该方法的可行性。

1) 在分析相同成像条件下图像像素特性畸变的基础上, 建立了小波变换成像校正的模型。通过校正因子的补偿作用, 使同一成像条件下不同 CCD 相机捕获的图像具有高度的一致性, 消除了同一目标异路图像之间的畸变。

2) 在利用小波变换进行多路成像非一致性静态校正的基础上, 进一步研究在线条件下多路成像非一致性动态校正。建立多路 CCD 成像动态校正效率评估函数, 利用不同小波对两路及多路成像校正效率进行评估。结果表明, 虽然 Daubechies3 和 Symlet3 小波在两路动态校正效率均较好。但在多路情况下 Symlet3 具有更高的校正效率, 而且 Symlet 系列小波相对于其它小波具有较高的校正效率。此方法在多 CCD 成像的实际应用中具有一定意义。

参 考 文 献

- 1 Sabry F. El Hakim, Claus Brenner, Gerhard Roth. A multi-sensor approach to creating accurate virtual environments[J]. *J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998, 53(6): 379~391

- 2 Masayo Suzuki, Masaki Yamamoto, Takashi Kumasaka *et al.*. A multiple CCD X-ray detector and its first operation with synchrotron radiation X-Ray beam[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1999, **A436**(2): 174~181
- 3 D. W. Davidson, C Frojdh, V. O'Shea *et al.*. Limitations to flat-field correction methods when using an X-ray spectrum[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2003, **A509**(3): 146~150
- 4 E. Kokkinou, K. Wells, M. Petrou *et al.*. Towards room temperature CCD autoradiography: methods for minimizing the effects of dark current at room temperature[C]. *Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2002 IEEE, **3**: 1624~1628
- 5 Y. Vander Haeghen, J. M. Naeyart, I. Lemahieu. Consistent digital color image acquisition of the skin[C]. *Engineering in Medicine and Biology Society*, 1998. Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE, **2**, 29 Oct. ~ 1 Nov., 1998
- 6 J. Heikkila. Geometric camera calibration using circular control points[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(10): 480~487
- 7 Young Jun Roh, Hyung Suck Cho. Design and analysis of X-ray digital tomosynthesis system[C]. Proceedings of the 40th SICE Annual Conference. International Session Papers, 25 ~ 27 July 2001. 252~258
- 8 Liang Lihong, lu Hongnian, Kong Fanqin. Non-uniform research of X-ray real-time digital radiography[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(4): 439~444 (in Chinese)
梁丽红,路宏年,孔凡琴. 射线检测数字实时成像的不一致性研究[J]. *光学技术*, 2003, **29**(4): 439~444
- 9 Wang Yi, Wang Jingjin, Wang Kuilu. An X-ray detector with multiple screen-CCD sensor for image system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(1): 234~238 (in Chinese)
王 义,王经瑾,王奎禄 等. 一种应用于 X 射线成像系统的多 CCD 图像传感器[J]. *光子学报*, 1999, **28**(1): 234~238
- 10 Zhang Pizhuang, Lu Hongnian. The correction of image photographed by CCD image sensors[J]. *Acta Armamentary*, 2000, **21**(4): 68~73 (in Chinese)
张丕壮,路宏年. 面阵 CCD 微光像感器图像的校正[J]. *兵工学报*, 2000, **21**(4): 68~73
- 11 Deng Qinghua, Zhang Xiaomin, Jing Feng. Phase self-correcting method for high power laser amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1225~1229 (in Chinese)
邓青华,张小民,景 峰. 高功率固体激光放大系统相位自校正方法研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1225~1229
- 12 Jiang Lihui, Zhao Chunhui, Wang Qi. Algorithm about suppressing speckle noise in coherent laser radar imagery[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 541~546 (in Chinese)
蒋立辉,赵春晖,王 骐. 相干激光雷达图像散斑噪声抑制算法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 541~546
- 13 Wu Yan, Yang Wanhai. Image fusion based on wavelet decomposition and evolutionary strategy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 671~676 (in Chinese)
吴 艳,杨万海. 基于小波分解和进化策略的图像融合方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 671~676
- 14 Fei Peiyan, Guo Baolong, Meng Fanjie. Target extraction of under water laser image based on statistic counteraction[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(7): 815~819 (in Chinese)
费佩燕,郭宝龙,孟繁杰 等. 基于统计对消的激光水下图像的目标提取法[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7): 815~819