

基于不可控微扫描的高分辨力图像重构方法*

陈艳, 金伟其, 徐超, 王霞, 高美静, 王岭雪

(北京理工大学 信息科学技术学院 光电工程系, 北京 100081)

摘要: 针对存在不可控微位移的序列低分辨力图像, 提出了一种基于 2×2 不可控微扫描的高分辨力图像重构方法, 采用投影法估算出低分辨力图像 LR 的微位移量, 采用基于泰勒级数展开的重构算法由 4 帧图像重构高分辨力图像. 模拟表明: 该算法能精确地估计序列图像的帧间位移量并取得较好的重构效果, 且算法简单有效可行, 处理量小, 有利于实现快速处理, 在一定程度上可满足同步轨道卫星、公安监视等领域对高分辨力成像处理的需求.

关键词: 图像重构; 不可控微位移; 图像配准; 高分辨力

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)08-2155-5

0 引言

近年来, 基于光学微扫描的高性能光电成像技术得到迅速发展, 其利用微扫描器在探测器帧间实现既定的微位移, 通过相邻多帧低分辨力 (Low Resolution, LR) 图像重构提高空间采样率, 并由图像处理方法获得高分辨力 (High Resolution, HR) 成像. 因此, 采用微扫描技术可从较低规模的探测器上获得更高分辨力的成像, 成为探测器水平受限条件下发展高性能光电成像系统的可行途径之一.

在同步轨道卫星的光电遥感成像、公安监视等需要高分辨力成像应用领域中, 由于观察视场以及探测器阵列规模等原因, 使得一些特征目标所占像素有限, 影响对特征目标的识别, 但由于成像平台存在微小抖动, 或由于场景中目标的微小移动, 使得获得的序列 LR 图像中场景图像或目标区域图像存在非整像素级的微位移, 利用这些具有不规则微位移的图像, 可望重构获得空间采样数成倍增加的目标场景 HR 图像. 由于此类 LR 图像序列的微位移不可控, 相对于位移可控的微扫描成像, 被称为不可控微扫描成像^[1-2].

在不可控微扫描成像过程中, 由于各帧 LR 图像之间的位移不受控制或预先未知, 重构 HR 图像的关键是序列帧 LR 图像间的位移量精确估计和 HR 图像重构算法. 文献[3]采用梯度法进行帧间微小位移的估计, 并根据多帧 LR 图像对 HR 像素的中值重构 HR 图像, 该方法虽然能够获得一定的重构效果, 但对噪声较大的 LR 图像微位移估计误差

较大, 且算法重构效果有限. 文献[4]采用与文献[3]相同的微位移估计法, 给出了一种超分辨力重构方法, 但算法处理效果不明显, 且采用超分辨力算法, 计算时间较长. 文献[5]针对微位移和小旋转角, 采用 keren 法进行微位移估计 (属于梯度法), 采用 POCS 法进行超分辨力重构, 取得了一定的重构效果. 本文将根据不可控微扫描 HR 图像重构的需要, 针对以上处理算法的问题, 研究一种基于投影 (Linear Interpolation Projection Based Shift Estimation, LIPSE) 的位移估计和泰勒级数展开的快速 HR 图像重构方法.

1 可控 2×2 模式微扫描 HR 图像的重构

可控微扫描成像是针对同一场景进行多次具有确定微位移的过采样成像过程^[6]. 按扫描顺序, 可控微扫描有 1×1 、 2×2 、 3×3 和 4×4 等模式. 以 2×2 模式为例, 如图 1, 保持系统成像视场不变, 使焦平面探测器相对于目标场景依次向右、向下、向左移动探测器单元间距的 $1/2$, 得到 4 帧欠采样 LR 图像^[6-7].

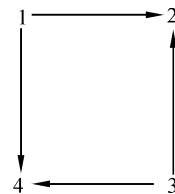


图 1 2×2 微扫描工作模式

Fig. 1 Working model of 2×2 microscanning

将 4 帧欠采样 LR 图像按照获取方式进行顺序插值得到 HR 图像 (如图 2), 由于提高了空间采样率, 重构的 HR 过采样图像包含了更多的目标场景信息, 可提高对图像细节的分辨能力.

* 北京微量化学研究所实验室开放基金 (P2008026EB) 和 航天 CAST 创新基金 (CAST200619) 资助

Tel: 010-68912569-515 Email: chenyan340206@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-05-26

修回日期: 2008-08-18

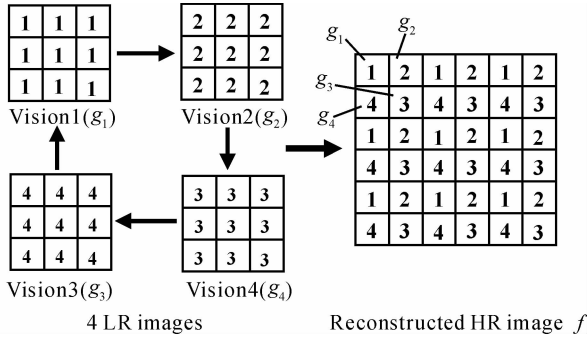


图 2 2×2 可控微扫描 HR 图像重构过程
Fig. 2 Reconstruction of 2×2 controlled microscanning

2 基于 2×2 不可控微扫描的 HR 图像重构算法

在不可控微扫描情况下,多帧 LR 图像间的位移是不确定的,在重构 HR 图像之前必须先进行位移估计.因此,微位移估计和高分辨力图像重构是不可控微扫描高分辨力成像的关键.

2.1 不可控微扫描 LR 图像的亚像素级微位移估计方法

一般研究中微位移估计大多采用梯度法^[3-4,9-10],本文已在基于场景的热成像非均匀校正处理算法研究中,为减小梯度法受随机噪声的影响,提出了一种基于投影的微位移估计 LIPSE 算法^[11],其把图像按照行、列投影成 2 个一维矢量,然后按一维矢量的均方差(MSE)最小来估计水平和垂直方向的位移,具有亚像素级精度且时效性强的特点.

设序列图像的尺寸为 $M \times N$,第 k 帧 $g(i, j, k)$,第 $k+1$ 帧 $g(i, j, k+1)$,将它们分别按行/列投影得到一维列/行矢量用来估计垂直位移 α 和水平位移 β .以垂直位移 α 为例,第 k 帧和第 $k+1$ 帧的列矢量分别为

$$\bar{g}(i, k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N g(i, j, k) \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

$$\bar{g}(i, k+1) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N g(i, j, k+1) \quad (2)$$

如图 3,假设第 k 帧和第 $k+1$ 帧之间垂直位移在 1 个像素之内,则移动帧 $\bar{g}(i, k+1)$ 可近似表示为

$$\hat{g}(i, k+1) = (1 - \Delta\alpha)\bar{g}(i, k) + \Delta\alpha \cdot \bar{g}(i+1, k) \quad (3)$$

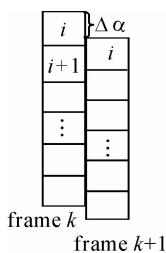


图 3 线性插值模型
Fig. 3 Model of linear interpolation

式中, $\Delta\alpha$ 表示垂直位移 α 的小数部分, α 的整数部分将在后面求取.于是, $\bar{g}(i, k+1)$ 与 $\hat{g}(i, k+1)$ 的均方差 MSE 为

$$\text{MSE}(\Delta\alpha) = \sum_{i=1}^M [\bar{g}(i, k+1) - \hat{g}(i, k+1)]^2 \quad (4)$$

MSE 对 $\Delta\alpha$ 求偏导,由驻点条件可得到亚像素级微位移 $\Delta\alpha$ 的最佳近似

$$\Delta\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \{\bar{g}(i+1, k) - \bar{g}(i, k)\} [\bar{g}(i, k) - \bar{g}(i, k+1)]}{\sum_{i=1}^{M-1} \{\bar{g}(i+1, k) - \bar{g}(i, k)\}^2} \quad (5)$$

对于微位移的整数部分 $[\alpha]$,可设置可能的最大整数位移移动范围 V ,在 $[-V, V]$ 内通过图像列矢量每次平移一个像素,计算各次的 $\Delta\alpha$,并取 $\min(\text{MSE})$ 时 α 的作为最终解.

LIPSE 对于帧间大或小位移的预测都有较好的准确性,由于采用了方向投影处理,不仅可降低随机噪声的影响,而且只利用两个一维矢量来估计水平和垂直位移,有效降低运算量,能适应高速处理的要求,较传统的梯度法^[3-4,9-10]更为有效.

2.2 不可控微扫描的高分辨力图像重构

不可控微扫描的 LR 图像不能直接嵌入 HR 网格,取 g_1 为基准图像,即 $g_1(i, j) = f(2i-1, 2j-1)$,由于帧间位移较小,将移动帧 g_t 按 g_1 的泰勒级数近似展开

$$g_t(i, j) \approx f(2i-1, 2j-1) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x_t +$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} \Delta y_t + \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \Delta x_t \Delta y_t + \dots \quad (t=2, 3, 4) \quad (6)$$

式中, $\Delta x_t, \Delta y_t$ 分别为在 x, y 方向的位移量.利用差分代替 $f(x, y)$ 的偏导

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f(2i, 2j-1) - f(2i-1, 2j-1)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = f(2i-1, 2j) - f(2i-1, 2j-1)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = f(2i, 2j) + f(2i-1, 2j-1) - f(2i, 2j-1) - f(2i-1, 2j) \quad (7)$$

式(6)取前四项,经过整理可以得到矩阵

$$\mathbf{A}\mathbf{F} = \mathbf{G}$$

$$\text{式中} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$a_{t1} = 1 - \Delta x_t - \Delta y_t + \Delta x_t \Delta y_t, a_{t2} = \Delta x_t (1 - \Delta y_t),$$

$$a_{t3} = \Delta y_t (1 - \Delta x_t), a_{t4} = \Delta x_t \Delta y_t \quad (9)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f(2i-1, 2j-1) \\ f(2i, 2j-1) \\ f(2i-1, 2j) \\ f(2i, 2j) \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_1(i, j) \\ g_2(i, j) \\ g_3(i, j) \\ g_4(i, j) \end{bmatrix} \quad (10)$$

不难证明:只要 4 帧 LR 图像的微位移不相关,则 A^{-1} 存在. 由于 A^{-1} 完全由微位移量 $\Delta x_i, \Delta y_i$ 确定, 当微位移量确定之后, 由

$$F = A^{-1}G \quad (11)$$

可唯一地确定 HR 图像 F . 由于只需代数运算, HR 图像的重构处理简单, 适合快速处理.

3 实验结果及误差分析

为了验证算法的有效性, 采用模拟图像和实际图像进行了实验.

3.1 Lena 图像的模拟仿真实验

图 4 给出 Lena 高分辨力图像 (256×256), 图 5 为 4 帧有微位移的序列低分辨力 Lena 图像 (128×128), 其 1 个像素尺寸相当于图 4 的 2×2 个像素. 以第 1 帧作为参考帧, 其余 3 帧相对于第 1 帧的微位移已在图中给出.



图 4 Lena 原始 HR 图像
Fig. 4 Original HR image of Lena



图 5 4 帧已知微位移的 LR 图像

Fig. 5 Four LR images with known micro-displacements

分别利用 LIPSE 法和梯度法估计第 2~4 帧相对于参考帧的位移量, 结果如表 1, 可以看出: LIPSE 法比梯度法估计位移精度约提高一个数量级, 在 AMD3000+ CPU, 内存 512 MB 的 PC 机上, 采用 Matlab 完成单帧图像定位处理的时间 LIPSE 法约为 0.003 s, 梯度法约为 0.02 s, 可见 LIPSE 法比传统的梯度法更为有效.

表 1 实际位移量及两种方法估计位移量 ($\Delta x, \Delta y$) (单位: 像元)

序列帧参数	第一帧	第二帧	第三帧	第四帧
实际位移量	(0, 0)	(1.700 0, 1.100 0)	(1.120 0, 1.520 0)	(1.340 0, 1.780 0)
LIPSE 法估计	(0, 0)	(1.659 0, 1.090 8)	(1.070 4, 1.512 4)	(1.297 2, 1.777 8)
梯度法估计	(0, 0)	(1.115 6, 0.795 2)	(0.508 4, 1.273 2)	(0.741 8, 1.459 8)

以 LIPSE 法估计的微位移量为基准, 将 4 帧图像分别直接嵌入高分辨力网格和基于泰勒级数重构得到的 HR 图像如图 6.



(A) Reconstructed HR image by direct interpolation
(B) Reconstructed HR image by this method

图 6 两种方法重构的 Lena HR 图像

Fig. 6 Lena HR images by two reconstructing methods

表 2 给出利用图像质量评价参量峰值信噪比 PSNR 和通用图像质量因子 Q 值^[12-13]对直接嵌入重构法和本文方法重构图像的比较. 可以看出: 本文

方法重构图像效果优于直接嵌入重构法. 且图 6(b) 与标准 2×2 可控微扫描重构的 HR 图像之间非常接近 (PSNR=82.60, Q=0.994 6). 模拟实验表明: LR 图像的微位移越接近可控微扫描微位移, 本文方法的 HR 图像效果越好.

表 2 重构图像评价参量

评价参量/重构方式	PSNR	Q 值
直接嵌入法	71.736 8	0.935 6
本文方法	74.744 4	0.968 1

3.2 实际拍摄车牌图像实验

图 7 给出从实际拍摄的视频段中截取的 4 帧序列图像 (像素为 160×120), 取第 1 帧作为参考帧, 其余 3 帧相对于第 1 帧的微位移量估计结果如表 3. 图 8 给出本文方法的 HR 图像, 直接嵌入重构法的 HR 图像以及对第 1 帧图像双线性插值放大图像的比较, 三种方法得到的 HR 图像信息熵分别

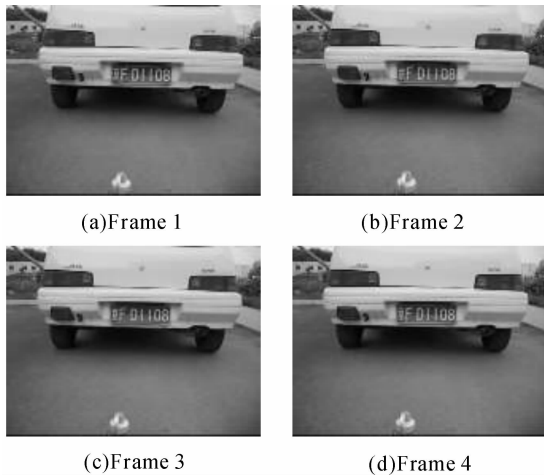
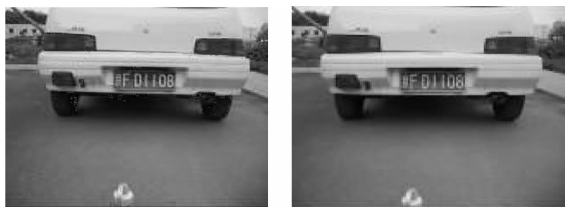


图 7 实际拍摄序列图像

Fig. 7 Practical serial images

表 3 LIPSE 法判断结果

序列帧参量	第 2 帧	第 3 帧	第 4 帧
微位移量估计	$\Delta x_2 = 0.936 6$ $\Delta y_2 = 0.872 4$	$\Delta x_3 = 2.231 8$ $\Delta y_3 = 1.686 6$	$\Delta x_4 = 0.621 4$ $\Delta y_4 = 1.649 4$



(a) Reconstructed HR image by this method

(b) Reconstructed HR image by direct interpolation



(c) Reconstructed HR image by bilinear interpolation

图 8 本文方法重构 HR 图像与直接嵌入法和双线性插值放大图像的比较

Fig. 8 Comparison of images reconstructed by direct interpolation, bilinear interpolation and this method

为: $SNT_{(a)} = 7.586 2$, $SNT_{(b)} = 7.523 6$, $SNT_{(c)} = 7.447 5$.

综上所述,本文方法的 HR 图像效果明显优于直接嵌入重构法和双线性插值法,重构方法有效、可行。

4 结论

本文提出了一种基于 2×2 不可控微扫描的高分辨率图像重构方法,采用抗随机噪声效果好、处理速度快的 LIPSE 法估计 3 帧 LR 图像相对第 1 帧 LR 参考图像的微位移量,通过基于泰勒级数展开的代数处理算法重构 HR 图像. 对模拟微位移图像和实际拍摄序列图像的重构实验表明:本文方法较

一般单帧插值或多帧直接嵌入方法均有更好的效果(目视效果和图像性能评价方法),不仅可明显提高成像质量,而且处理算法简单,计算量小,有利于实现高速处理,可望在实际系统中获得有效的应用。

参考文献

- [1] ZHANG Nan, JIN Wei-qi, SU Bing-hua, *et al.* Research and recent advance of high resolution infrared image reconstruction technology[J]. *Acta Armamentarii*, 2005, **26**(2):173-175. 张楠, 金伟其, 苏秉华, 等. 高分辨率红外热图像重建算法的进展及研究[J]. *兵工学报*, 2005, **26**(2):173-175.
- [2] SU BING-hua, Jin Wei-qi, Niu Li-hong, *et al.* Poisson-Maps super-resolution image restoration algorithm Markov constraint[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(4):492-496.
- [3] ZHAO Ling-jun, SUN Ji-xiang. An algorithm for extracting high resolution image from low resolution frames [J]. *Electronics Optics & Control*, 2005, **12**(2):27-29. 赵凌君, 孙即祥. 一种从低分辨率图像序列获取高分辨率图像的算法[J]. *电光与控制*, 2005, **12**(2):27-29.
- [4] CHEN Xiao-qiang, ZHANG Jun, WU Le-nan. Image interpolation in superresolution from multiple frames [J]. *Signal Processing*, 2004, **20**(3):268-270. 陈小蔷, 张俊, 吴乐南. 多帧超分辨率重建中的图像插值[J]. *信号处理*, 2004, **20**(3):268-270.
- [5] FAN Chong, GONG Jian-ya, ZHU Jian-jun. POCS super-resolution sequence image reconstruction based on improvement approach of keren registration method [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2006:28-30. 范冲, 龚健雅, 朱建军. 基于 keren 改进配准算法的 POCS 超分辨率重建[J]. *计算机工程与应用*, 2006:28-30.
- [6] ZUO Yue-ping, ZHANG Jian-qi. Modeling and simulation of micro-scanning imaging systems in several patterns [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2003, **22**(2):145-148. 左月萍, 张建奇. 几种工作模式的微扫描成像系统的理论建模和仿真[J]. *红外与毫米波学报*, 2003, **22**(2):145-148.
- [7] XU Chao, JIN Wei-qi, LI Ya-qiong. Optical microscanner technique and realization[J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(6):338-342. 徐超, 金伟其, 李雅琼. 光学微扫描器技术及其实现方式[J]. *红外技术*, 2006, **28**(6):338-342.
- [8] ZUO Yue-ping, ZHANG Jian-qi. Technique to improve resolution and imagery of a given imager-microscanning[J]. *Infrared Technology*, 2001, **23**(4):15-17. 左月萍, 张建奇. 一种提高系统分辨率、改善图像质量的技术—微扫描[J]. *红外技术*, 2001, **23**(4):15-17.
- [9] IRANI M PELEG S, Improving resolution by image registration [J]. *CVGIP-Graphical Models and Image Processing*, 1991, **53**(3):231-239.
- [10] HARDIE R C BARNARD K J, J G Bogner, *et al.* High-resolution image reconstruction from a sequence of rotated and translated frames and its application to an infrared imaging system[J]. *Opt Eng*, 1998, **37**(1):247-260.
- [11] 隋婧. 基于场景的帧间自适应红外焦平面非均匀性校正算法研究[D]. 北京: 北京理工大学光电工程系, 2007.
- [12] GONZALEZ R C WOODS R E. Digital image processing

[M]. 2nd, Upper Saddle River, New Jersey, 2002.

IEEE Signal Processing letters, 2002,9(3):81-83.

[13] WANG Z W Bovik A C. A universal image quality index[J].

High Resolution Image Reconstruction Based on Uncontrolled Microscanning

CHEN Yan, JIN Wei-qi, XU Chao, WANG Xia, GAO Mei-jing, WANG Ling-xue
(*Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract: Aiming at a series of Low Resolution (LR) images with uncontrolled micro-displacements, an algorithm based on 2×2 uncontrolled microscanning is represented to reconstruct the High Resolution (HR) image. It uses the algorithm of Linear Interpolation Projection based on Shift Estimation (LIPSE) to estimate the micro-displacements of the LR images, and then reconstructs the HR image from the four LR images by using the reconstruction algorithm based on Taylor series expansion. Simulation and practical image processing demonstrate that this algorithm can estimate displacements accurately of serial images and get good reconstruction effect, and the algorithm is simple but effective with small processing load, so it is very possible to achieve fast processing. The method is hopeful to meet the demand of HR imaging in the fields of synchronous satellite and public surveillance.

Key words: Image reconstruction; Uncontrolled micro-displacement; Image registration; High resolution.



CHEN Yan is a M. S. degree candidate, and her research interests focus on digital image processing.