

TDICCD 相机大视场多通道遥感 图像自动拼接方法^{*}

禄金波^{1,2} 何 斌¹

1(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 在 TDICCD 大视场多通道遥感图像的拼接中, 由于存在成像平台谐振及颤振等因素的影响, 以往的经典方法抗噪性和鲁棒性不高, 很难达到图像高精度和快速拼接的要求. 为此, 提出了一种空域互相关自校正亚像素配准方法. 该方法针对 TDICCD 多通道图像间重叠像素的特点, 采用变搜索窗口的互相关系数作为评价函数; 采用局部检测法监视图像参数的变化, 找出图像每一部分最佳参数; 采用干扰点排除法控制图像中误匹配的点, 使参数更加可信; 在最佳点配准的基础上, 采用所提出的亚像素定位法对配准进行补偿. 实际遥感图像拼接结果证明, 该算法精度优于 0.1 pixel, 同时比其他方法速度快, 稳定性、抗噪性和鲁棒性都很高, 拼接图像获得了良好的效果.

关键词 TDICCD, 遥感图像, 多通道, 空域互相关, 亚像素

中图法分类号 V 524, TP 751.1

Automatic Mosaic Method of Large Field View and Multi-Channel Remote Sensing Images of TDICCD Cameras

LU Jinbo^{1,2} HE Bin¹

1(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033*)

2(*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

Abstract In terms of mosaic of TDICCD large field view and multi-channel remote sensing images, noise immunity and robustness of the previous classical method is not high, which is difficult to achieve high accuracy and fast image mosaic because of imaging resonance, flutter and other factors in the imaging platforms. For that reason, this paper proposes a more appropriate method, namely the spatial cross-correlation self-tuning sub-pixel registration method. Firstly, because of the characteristics of overlapping pixels between TDICCD multi-channel images, the method uses the

* 国家高技术研究发展计划项目资助 (863-2-5-1-13B)

2010-08-06 收到原稿, 2011-08-29 收到修定稿

E-mail: lujinbo_jiaoda@sina.com

cross correlation of variable search window as the evaluation function. Secondly, the local detection method is employed to monitor change of parameter to figure out the best parameters of each part of images. Thirdly, the matching error points are controlled by interference elimination method, so that parameters are more credible. Finally, sub-pixel locating algorithm is proposed to reduce error of image registration. The results of practical remote sensing image mosaic indicate that accuracy of the algorithm exceeds 0.1pixel, while rapidity, stability, noise immunity and robustness are higher than other methods and image mosaic obtains expected results.

Key words TDICCD, Remote sensing image, Multi-channel, Spatial correlation, Sub-pixel

0 引言

图像拼接是将数张有重叠部分的图像拼成一幅大型无缝高分辨率图像的技术。当前主要的图像拼接方法有, 基于特征提取的图像配准^[1] (主要包括图像角点和轮廓的提取), 基于相位相关的频域配准^[2], 基于像素灰度值的配准^[3]。基于特征提取的方法计算速度较快, 但是拼接正确性直接依赖于特征提取的精度。基于相位相关的方法具有一定的抗噪性和抗干扰性, 但是对重叠像素的大小要求比较高。基于灰度的方法简单直观, 但是抗干扰性比较差。

这里主要讨论 TDICCD 大视场多通道卫星图像的拼接。TDI (Time Delay and Integration)^[4-5] 是一种能够增加线扫描传感器灵敏度的扫描技术。大视场 TDICCD 相机采用多片 TDICCD 拼接, 多通道输出遥感图像。TDICCD 相机采用推扫成像的原理, 各片 TDICCD 成品字型排列, 并且首尾有一定的像素重合。除此之外, 从欧洲航天局 (ESA) 发射的 OLYMPUS 通信卫星和美国宇航局戈达德航天中心 (GSFC) LANDSAT4 在轨测量的颤振数据^[6-7] 可知, 由于动量轮变速转动、喷气、指向控制、太阳帆板调整等运动^[8], 会使相机产生颤振, 对相机图像影响很大。

TDICCD 各个通道图像主要有以下特点。第一, 各通道间有限重叠像素的限制。该重叠像素在行方向上空间较大, 在列方向上重叠较少, 影响特征点配准精度。第二, 卫星颤振使图像间重叠像素整体成波动变化趋势, 使配准参数也随之改变。第三, 由于天气状况和地形条件的差异, 使图像层次和纹理特征不规则变化, 从而图像的配准干扰点存在较多。

针对图像的特点, 单独每种方法均不能满足现有遥感图像拼接的要求。因此, 本文提出一种空域配准

方法。该方法以互相关系数为评价函数, 通过自检测搜索和亚像素定位进行点的精确配准, 以此来反映图像整体和局部的配准参数, 达到精确配准的目的。

1 空域互相关配准关键技术

空域互相关配准直接利用多通道图像间有限重叠像素的灰度量两幅图之间的相似性, 不进行特征提取和频域变换。这样可以避免主观因素的影响, 配准结果只依赖于配准方法本身, 同时还可以避免特征提取和频域变换过程中所带来的误差, 并能实现完全自动的配准。此外, 根据 TDICCD 多通道图像的特点, 可以基于空域互相关提出多变参数、自校验和亚像素定位方法, 使配准既精准又快速。

1.1 多通道图像间非线性变换模型

由于 TDICCD 成像特点, 卫星在轨平台的颤振, 相机俯仰、侧摆以及大气状况等因素的影响, 使多通道图像间的重叠像素具有正弦变化的全局形变, 但是可用仿射变换近似表示局部形变。局部变换公式如下:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中, λ 为缩放系数, s_x 和 s_y 为平移量。通过局部仿射变换, 图像整体为正弦变化的非线性变换。在图 1 中, 实测卫星成像时多通道图像间重叠像素的波形, 整体变化规律如下:

$$O = A(t) \sin(\omega_n t + \varphi). \quad (2)$$

其中, O 为重叠像素, 单位 pixel; $A(t)$ 为其变化的振幅, 是可变量; ω_n 为变化频率; t 为时间自变量, 在图 1 中为图像的行数。图 1 表明, 在一定时间范围 t 内保持式 (1) 不变, 整体呈式 (2) 的变化趋势。

1.2 归一化互相关系数

选取互相关系数作为评价准则,因为它在多通道图像的配准中,准确性高,对图像灰度值线性变化免疫;可以根据重叠像素的大小来调整搜索窗口的大小;具有重叠像素行方向较大、列方向较小的特点,可以选择矩形搜索窗口.这里选择归一化互相关系数,公式如下:

$$N_c = \frac{\sum_x \sum_y [G(x, y) - \bar{G}(x, y)][F(x + m, y + n) - \bar{F}(x + m, y + n)]}{\sqrt{\sum_x \sum_y [G(x, y) - \bar{G}(x, y)]^2 \sum_x \sum_y [F(x + m, y + n) - \bar{F}(x + m, y + n)]^2}}. \quad (3)$$

其中, N_c 为归一化的互相关系数, $G(x, y)$ 和 $\bar{G}(x, y)$ 分别为基准图像的计算模板像素点的灰度值和均值, $F(x + m, y + n)$ 和 $\bar{F}(x + m, y + n)$ 分别为待配准图像中变化的搜索图灰度值和均值.

1.3 多通道图像自校正搜索方法

由式 (1) 和式 (2) 可知, 图像在一定的局部范围呈式 (1) 的变化趋势, 在全局呈正弦波动变化趋势. 由此可见, 需要对图像进行全局搜索配准. 对于 TDICCD 多通道图像, 进行全局搜索所要考虑的主要因素包括: 搜索算法要具有良好的监视性, 即要检测出图像配准时所有变化的参数; 由于遥感图像很大, 行数最大可达 500 000 行, 要求搜索算法有快速计算的能力; 由于遥感图像内容的复杂性, 例如图像中某一部分经常出现大海、云层等层次特征较少的区域, 这就会使配准时互相关系数检测出的点是干扰点, 所以搜索算法要能排除干扰点.

基于以上要求, 对图像进行全局点匹配, 通过互相关系数找出最佳匹配点, 进而根据点的位置反映配准的参数变化. 根据以上所述图像的特点, 可以对算法设计如下.

①行递增搜索. 对图像进行隔行搜索, 以免漏检因局部形变引起的参数变化. 基本方法是固定基准图像的列数, 行数每次递增 2.

②搜索范围的更新. 根据上一次的计算参数, 自动计算出下一次搜索的中心点, 再限制一定的搜索范围, 可以大幅提高搜索速度. 基本方法将本次和上次基准图像的点的差值补偿给上一次在待配准图像中找出的配准点, 从而得到本次的搜索中心点.

③三点检验法剔除干扰点. 图像的配准参数是

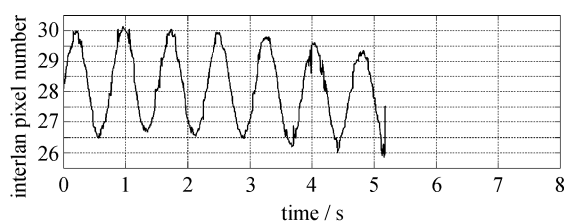


图 1 图像重叠像素变化规律

Fig. 1 Variation rule of image overlap pixel

变化的, 然而其变化是有规律的, 呈现局部稳定及整体正弦变化的趋势. 所以对于找出的每一个点, 都要进行自校正, 以防止干扰点的产生. 对于每一个在待配准图像中找出的点, 要用基准图像当前点的上一行和后 30 行的点来进行配准检验. 如果三点的参数都变化, 即认为此参数变化是可信的; 如果其中一点不一致, 则否决该参数的变化, 继续坚持原参数进行搜索. 寻找初始点时, 同样适用三点检验法.

1.4 亚像素定位

点配准算法均在整数像素灰度处进行计算, 精度最大能达到 1 pixel, 然而对于 TDICCD 多通道图像间的重叠像素而言, 一个像素精度是不够的, 必须进行更高精度的定位.

在以往的亚像素定位算法中, 常用两种经典算法, 即最小二乘曲面拟合法^[9]和像素插值法^[10]. 但是对于 TDICCD 相机图像, 其有很多缺点. 最小二乘曲面拟合算法虽然速度比较快, 但是有时候获得的数据并不一定可靠. 因为用二次曲线并不一定能够对位置与相关系数的关系进行准确近似. 而且在初始的整数像素配准时, 如果相关系数不是很高, 那么离中心像素越远, 相关系数的误差越大, 这样获得的拟合结果可能是发散的. 所以该方法稳定性不高. 像素插值移动算法稳定性很好, 但是算法速度很慢. 要获得比较精确的结果必然会使计算时间成倍增加, 因此定位精度也会受到限制.

本文提出的迭代插值拟合法, 结合了拟合法与插值法的优点, 同时比较好地满足了 TDICCD 遥感图像精确性和快速性的指标. 算法先利用曲面拟合的思想, 对亚像素进行第一次补偿. 为了满足快速性指

标, 这里不用最小二乘拟合法, 而是把曲面分切为 x 和 y 方向的切面线进行曲线拟合. 这样就直接避免了线性方程的求解问题, 很大程度上加快了算法的速度. 随后, 用三次插值法对该补偿点进行计算, 利用其结果进行下一次迭代计算, 直到满足需要的精度为止. 其算法主要过程如下.

①以粗匹配找出的最佳配准点为中心点, 在其周围 3×3 (pixel) 大小的范围内对曲面分别进行 x 方向和 y 方向切面线拟合, 每个方向为 3 个点. 然后得出一个最佳的亚像素补偿点. 计算时首先利用拉格朗日插值多项式进行拟合, 然后再求导计算最大值. x 方向的拟合公式如下:

$$\begin{aligned} \varphi(x) = & f(u) \frac{(x-v)(x-w)}{(u-v)(u-w)} + \\ & f(v) \frac{(x-w)(x-u)}{(v-w)(v-u)} + \\ & f(w) \frac{(x-u)(x-v)}{(w-u)(w-v)}. \end{aligned} \quad (4)$$

令 $\varphi(x)' = 0$, 可求得 x 方向的亚像素补偿值

$$\Delta x = \frac{1}{2} \cdot \frac{(v-u)^2[f(v)-f(u)] - (v-w)^2[f(v)-f(w)]}{(v-u)[f(v)-f(u)] - (v-w)[f(v)-f(w)]}. \quad (5)$$

②利用下式对该最佳的补偿点进行 3 次插值计算, 并利用式 (3) 得出其相关系数, 即

$$A(x) = \begin{cases} (x-2)xx+1, & (x \leq 1); \\ [(-x+5)x-8.0]x+4.0, & (1 < x \leq 2); \\ 0, & (x > 2). \end{cases} \quad (6)$$

③判断已找出的 4 点的相关系数大小, 以此为依据进行迭代数据的替换和更新, 剔除最不相关的点.

④以筛选过的最相关的几点为新的拟合点, 算出新的最佳亚像素补偿点.

⑤判断该新的补偿点和上一次补偿点是否满足需要的精度. 如果满足则停止计算, 反之则继续循环.

通过以上算法的处理, 能精准定位亚像素, 最高能达到 0.01 pixel 左右, 而且算法速度很快, 具有二次曲线的收敛速度. 得到图像的亚像素数据后, 即可对图像间的重叠像素进行精确定位, 从而准确反映卫星平台上 TDICCD 相机的变化规律.

2 图像整体拼接流程

根据空域互相关配准算法的关键技术, 可以对 TDICCD 多通道图像间的整体拼接流程进行如下描述.

①读入 TDICCD 相邻通道的两幅图像.

②初始条件设定. 设定大概的搜索范围和互相关搜索窗口的大小及形状.

③寻找初始点对. 在基准图像上选取初始点, 根据已设定好的初始条件进行搜索, 找出初始点对.

④用三点检验法判断初始点对是否可信, 可信则进入⑤, 不可信则返回②.

⑤用自校正搜索法搜索本次初始点.

⑥根据点的行和列的参数, 检验配准参数是否改变, 若不改变, 则返回⑤, 改变, 则进入⑦.

⑦图像融合. 根据已计算出的配准参数选择加权平均的方法, 利用

$$I_3 = I_1 + (I_2 - I_1)\alpha \quad (7)$$

进行图像融合. 其中, I_1 和 I_2 是两幅图像重叠区域分别对应的像素, α 为加权系数. 由于存在亚像素偏差, 式 (7) 和式 (6) 配合使用, 对需要融合的像素进行插值, 使融合达到像素精度.

⑧把拼接的图像数据写入文件, 然后返回⑤, 直到整幅图像拼接完成.

3 实例计算及分析

利用已提出算法进行卫星在轨图像数据的计算, 直接对一具体卫星在不同时间的 TDICCD 多通道遥感图像进行处理. 相机通道数为 17, 图像的灰度值为 10 位, 格式为 RAW, 总像素大小为 $4096 \times 300\,000$ (pixel). 采用其中的第 8 片和第 9 片图像进行计算.

3.1 自校验全局搜索方法的验证

在图 2 和图 3 中两幅图层次特征明显. 直接利用互相关系数在全局范围内搜索, 可以获得良好的配准结果, 其与加入自校验搜索方法所获得的结果一样. 然而在图 4 和图 5 两幅图中, 有云层的干扰, 层次特征不明显, 此时前者就会找出许多的干扰点, 这些干扰点的特征是在行和列方向无规则的抖动, 严重干扰了整幅图的拼接. 而加入自校验搜索方法的计算能获得

得规则点的变化. 如果图像中有云层、大海和其他的干扰区域时, 必须用自校验搜索方法.

3.2 亚像素定位检验

这里选取卫星图像中参数稳定的一部分图像进行迭代插值拟合法定位精度的检验. 图 6 为点配准的示例. 表 1 中给出了具体计算的数据和计算时间. 由表 1 数据可知, 基于轮廓和基于频域的方法在两类图像中均不能获得良好的结果. 而本文提出的方法由于其良好的检测性和排干扰性, 在图 6 中的定位精度达 0.02, 在图 7 中由于有云层的干扰, 定位精度为 0.2.

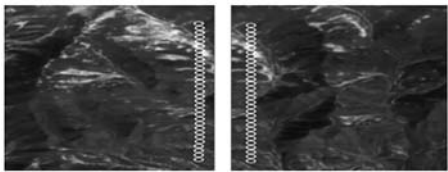


图 2 非干扰图直接互相关系数计算
Fig. 2 Cross correlation coefficient computation

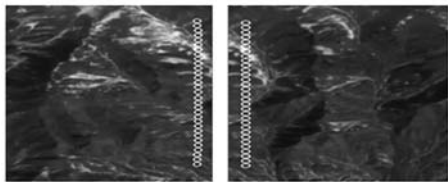


图 3 非干扰图自校验搜索计算
Fig. 3 Self-tuning search computation

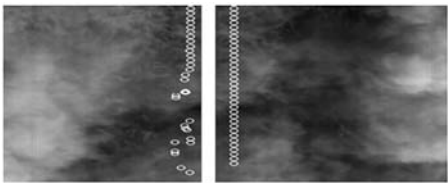


图 4 干扰图直接互相关系数计算
Fig. 4 Cross correlation coefficient computation

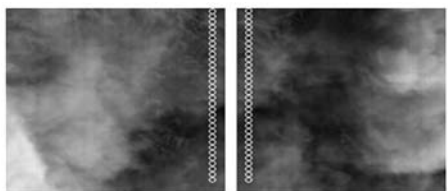


图 5 干扰图自校验搜索计算
Fig. 5 Self-tuning search computation

3.3 整幅图像拼接效果

这里对 2010 年 4 月 9 日成像的第 9 通道和第 8 通道进行图像整体拼接. 图 8(a) 为 TDICCD 第 9 通

表 1 配准数据表
Table 1 Registration data

	图 6 (单位 pixel)	图 7 (单位 pixel)	计算时间/s
理论平移	(35.50, 10.50)	(30.50, 15.50)	
基于轮廓	(34.78, 10.04)	(28.51, 14.01)	6.5
基于频域	(33.21, 12.14)	(27.16, 17.03)	5.5
空域相关	(35.49, 10.52)	(30.72, 15.23)	6.0

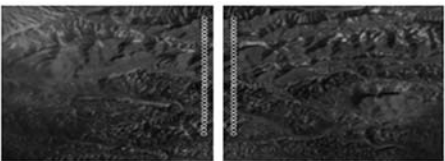


图 6 层次丰富卫星图像
Fig. 6 Sharp defined satellite image

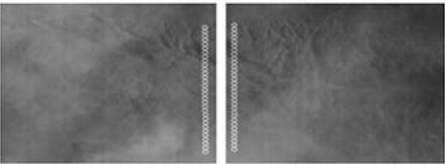


图 7 云层干扰卫星图像
Fig. 7 Cloudy sky satellite image

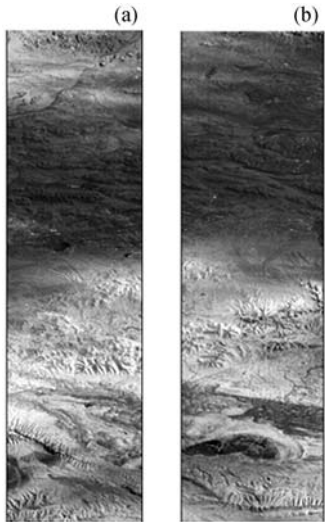


图 8 TDICCD 图像. (a) 第 9 片图像, (b) 第 8 片图像
Fig. 8 TDICCD image. (a) ninth image, (b) eighth image

道图像, 图 8(b) 为第 8 通道图像, 分三种方法拼接. 图 9(a) 为空域互相关整体拼接图, 图 9(b) 为局部特征放大图, 图 9(c) 为边缘放大图. 由图 9 可知, 该方法实现了非线性模型的整体拼接, 同时基本消除了拼接接缝, 获得了良好的效果. 图 10(a) 为特征提取整体拼接图, 图 10(b) 为局部放大图, 图 10(c) 为边缘

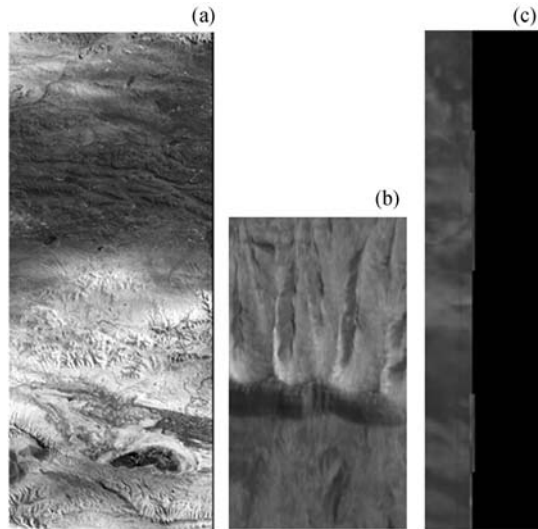


图 9 空域互相关拼接图像. (a) 整体, (b) 局部放大, (c) 边缘放大

Fig. 9 Cross correction mosaic image. (a) total, (b) local magnified, (c) edge magnified

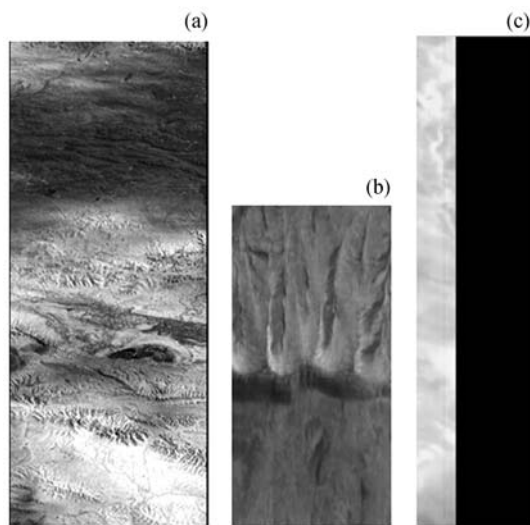


图 10 特征提取配准拼接图像. (a) 整体, (b) 局部放大, (c) 边缘放大

Fig. 10 Characteristic registration. (a) total, (b) local magnified, (c) edge magnified

放大图. 图 11(a) 为傅里叶整体拼接图, 图 11(b) 为局部放大图, 图 11(c) 为边缘放大图. 由图 10~11 可知, 后两者都有明显的错位.

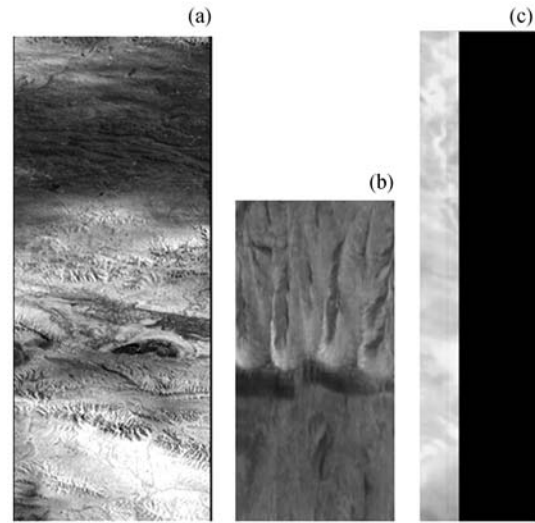


图 11 傅里叶配准拼接图像. (a) 整体, (b) 局部放大, (c) 边缘放大

Fig. 11 Fourier Registration. (a) total, (b) local magnified, (c) edge magnified

4 结论

针对卫星在轨 TDICCD 多通道图像的特点, 进行了空域互相关算法的设计, 同时提出自校验搜索算法和亚像素定位算法, 排除了因遥感图像复杂性的多种因素造成的干扰点, 实现了多通道图像间颤振规律变化的非线性模型的配准, 很好地解决了拼接的精确性和快速性问题. 该方法在卫星在轨图像拼接领域是一种值得借鉴的方法.

参考文献

- [1] Dai X L, Khorram S. A featurebased image registration algorithm using improved chaincode representation combined with invariant moments [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1999, **37**(5):2351-2362
- [2] Kuglin C, Hines D. The phase correlation image alignment method [C]//Proceedings IEEE International Conference on Cybernetics and Society. New York: IEEE, 1975
- [3] Han Xiaowei, Yan Lei, Zhao Hongying. An approach of fast image mosaic based on binary region segmentation [J]. *Proc. Int. Soc. Opt. Eng.*, 2007, **6279**:627957
- [4] Ren Jianyue, et al. Precision measurement of TDICCD

- interleaving assembly [J]. *Opt. Prec. Eng.*, 2008, **16**(10): 1852-1857. In Chinese (任建岳, 等. CCD 交错拼接的精度检测 [J]. 光学精密工程, 2008, **16**(10):1852-1857)
- [5] Zheng Gengfeng, *et al.* Design of test system for motion images of space TDICCD cameras [J]. *Opt. Prec. Eng.*, 2010, **18**(3):1623-629. In Chinese (郑耿峰, 等. 空间 TDICCD 相机动态成像地面检测系统的设计 [J]. 光学精密工程, 2010, **18**(3):1623-629)
- [6] Xu Peng, *et al.* Simulation analysis for image quality in satellite vibration [J]. *J. Astron.*, 2003, **24**(3):259-263. In Chinese (徐鹏, 等. 卫星振动对成像质量影响的仿真分析 [J]. 宇航学报, 2003, **24**(3):259-263)
- [7] Hayden W, Mcullough T, Reth A, *et al.* Wide-band precision two-axis beam steered tracking servo design and test results [C]. The International Society For Optical Engineering, 1993, **1866**:271-279
- [8] Lee S, Alexander J W, Jeganathan M. Pointing and tracking subsystem design for optical communications link between the international space station and ground [C]//The International Society For Optical Engineering, 2000, **3932**:150-157
- [9] GuoYin, Kawano A, Thompson D L. Interpolating moving least-squares methods for fitting potential energy surfaces: Applications to classical dynamics calculations [J]. *J. Chem. Phys.*, 2004, **121**(1115):1-25
- [10] Psarakis E Z, Evangelidis G D. An enhanced correlation-based method for stereo correspondence with subpixel accuracy [C]//Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Computer Vision. Washington: IEEE Computer Society, 2005

Genetic Algorithm for Orbital Optimization to Approach Multiple Constellation Satellites	
..... ZHANG Jing WU Meiping FU Xiaofeng (99)	
Study of Spacecraft Attitude Tracking Using Variable Speed Control Moment Gyros	
..... JIA Feilei XU Wei LI Hengnian HOU Liqiang ZHANG Zhibin (106)	
Steering Law Design for SGCMG Based on Optimal Output Torque Capability	
..... SUN Zhiyuan JIN Guang XU Kai ZHANG Liu YANG Xiubin (113)	
Analysis and Study of Ranging Code Performance Based on Deep Space Pseudo-Noise (PN) Ranging System	
..... GAO Yang YAN Yi CUI Yongshun YAO Xiujian (123)	
Analysis and Calculation for Current Leakage Effect of High Voltage Solar Array in LEO	
..... SHI Liqin LIU Siqing ZHENG Huinan (130)	
Research of Blue/Red Reflecting for Space Silicon Solar Cell	
..... LEI Gang SHEN Zhenjue CAO Jiaye (136)	
A High-speed Simulation Method of Star Map Based on Three Orthogonal Axis Planes	
..... QUAN Wei XU Liang NING Xiaolin (141)	
Coordinated Motion Control and Vibration Suppression of Rigid-Flexible Space Robot Based on Neural Network	
..... CHEN Zhiyong CHEN Li (147)	
Automatic Mosaic Method of Large Field View and Multi-Channel Remote Sensing Images of TDICCD Cameras	
..... LU Jinbo HE Bin (154)	