光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021071802

小型CMOS图像传感器星点成像性能分析

王佳怡[1,2,3]，房陈岩[1,2,3]，尹达一[1,2,3]*

（1. 中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083；
2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室，上海 200083；3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 精细导星仪(FGS)是空间天文望远镜精密稳像系统高精度姿态信息的快速检测装置，CMOS图像传感器的成像效果直接影响精细导星仪姿态信息的解算精度。而实际工作时，CMOS成像器件存在最佳的读出范围，超出此范围的入射光强与光生电子数的线性度低，无法获取有效星点来满足后级的质心坐标解算。为解决这一问题，提出一种估算不同星等最佳积分时间的方法，并将积分时间作为探测器参数选择与调整的主要依据。测量结果表明，像元暗电流的读出码值和探测器面阵RMS噪声值均随积分时间的增加而增加。依据星点光斑分布模型给出常用星等的最佳积分时间范围，结合星点的分布情况，得出7等星在视场范围内的星数约为7颗，论证了小型CMOS器件对星斑的探测能力。

关键词： 导星仪；CMOS图像传感器；噪声测量；星图成像；积分时间；星等

中图分类号： TN29　**文章编号：** 1001－5868(2021)05－0721－05

Performance Analysis of Star Detection by Small-Scale CMOS Image Sensor

WANG Jiayi[1,2,3], FANG Chenyan[1,2,3], YIN Dayi[1,2,3]

(1. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN;
2. Key Lab. of Infrared System Detection and Imaging Technol. of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: Fine guidance sensor (FGS) in the space astronomical telescope can realize high-precision measurement of attitude information for the precision image stabilization system. The imaging effect of the CMOS image sensor (CIS) directly affects the calculation accuracy of FGS. However, the CMOS imaging device has the best readout range in actual operation, and the linearity of the incident ray intensity and the number of photo-generated electrons beyond this range is low, and the effective star points cannot be obtained to meet the centroid coordinate solution of the later stage. In order to solve this problem, a method for estimating the best integration time of different magnitude is proposed and the integration time can be used as the main basis for the selection and adjustment of detector parameters. The measurement results show that both the dark current of the sensor and the RMS noise will increase with the increasing integration time. According to the star facula distribution model, the best integration time range of commonly used stars is calculated. Combining with the star spot distribution, it is concluded that there are about seven stars in the field of view of 7-magnitude stars, which demonstrates the detection ability of small CMOS devices for star spots.

Key words: FGS; CIS; noise measurement; star imaging; integration time; stellar magnitude

收稿日期：2021－07－18.

* **通信作者：**尹达一

0 引言

空间天文望远镜在轨工作时受到不同频率的扰动，其稳像系统按照频率补偿范围划分为三级：被动隔振系统、指向跟踪系统和精密稳像系统。精密稳像系统负责对指向跟踪系统的残差进一步抑制。精密稳像系统中的精细导星仪（Fine Guidance Sensor，FGS）通过光学系统的边缘视场加入单独的成像仪器对恒星星斑成像，通过质心定位算法获得高精度的望远镜光轴位置信息，得出光轴偏差，为系统提供反馈，实现精密稳像系统的闭环控制[1]。

CMOS 图像传感器（CMOS Image Sensor，CIS）作为精细导星仪的成像器件，负责获取恒星星点图像数据。CMOS 器件的实际结构使其工作过程中的读出电荷存在最佳范围，此范围内的入射光强与光生电子数的线性度高，能够保证后级系统提取到的质心坐标精度更高。导星仪依据提取的多个星点质心与星表进行匹配，获得视轴姿态数据，不同的匹配算法对于有效星点数的要求不同，有效星点数与探测器的工作条件和星等有关。恒星星等与星点目标的明暗程度有关，经过光学系统和探测器焦面成像获得星点图像，星点图像将用于质心提取和飞行器绝对姿态求解。

稳像系统中的导星仪利用光学视场边缘成像，但目前应用的探测器尺寸普遍偏大，导致需要处理的原始图像数据量增大，同时也增加了导星仪的体积。本文通过实测无光照条件下的暗电流，根据星点光斑分布模型得出不同星等的恒星最佳积分时间范围，提出一种小型 CMOS 探测器星图成像过程中积分时间调整的计算方法，论证了此类小型探测器对星点成像应用的可行性。

1 影响星点成像的探测器性能参数

集成化的 CMOS 图像传感器实际上是一个小型图像系统，像素单元利用光电效应产生电荷，通过行选电路根据需要选通像素阵列中的相应行实现随机开窗，行像素单元的图像信号经过模数转换和信号处理，最终由数据总线输出图像信号。典型结构通常包括像素阵列、行/列驱动器、时序逻辑单元、模数转换器、控制接口、数据总线接口等部分，且被高度集成在同一块硅片上，具有高度集成化的特点[2]。将数字信号处理功能集成到芯片内，有效减小模拟信号传输中的噪声和信号串扰，提高了信号处理能力和传输速度[3-5]。CMOS 图像传感器目前已经广泛应用于航空航天领域，探测器基本性能参数包括：光学灵敏度、暗电流、动态范围、噪声、帧频、满阱容量等。

对于 CMOS 图像传感器而言，噪声通常可以分为随机噪声（Random Noise）和模式噪声（Pattern Noise）。随机噪声也称时间噪声，是时间的随机函数，随图像帧而变化。如暗电流，光电探测器的散粒噪声，像素复位晶体管、源极跟随器和行选通晶体管的热噪声、散粒噪声、$1/f$ 噪声，列放大器的热噪声、$1/f$ 噪声等；模式噪声也称空间噪声，不随图像帧而变化，如固定模式噪声（FPN）、光响应非均匀性（PRNU）[6-7]等。

图 1 为 CMOS 图像探测器成像过程的噪声分布情况。其中读出噪声、FPN 噪声、暗电流散粒噪声、光子散粒噪声等的影响与积分时间有关，且与积分时间呈反比；暗电流非均匀性噪声和光响应非均匀性噪声对星斑质心定位的影响与积分时间无关[8]。

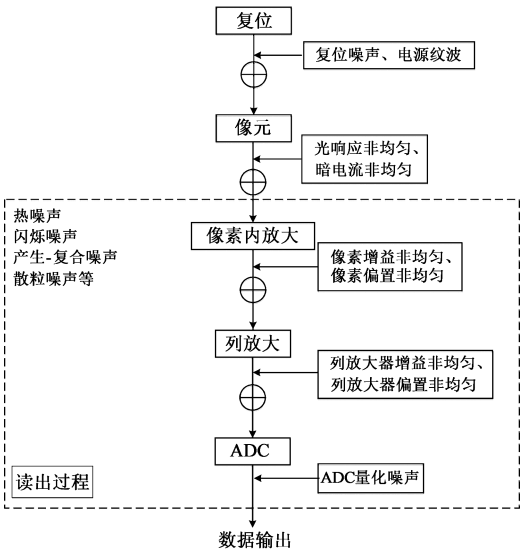


图 1 成像过程噪声分布

CMOS 探测器系统噪声的读出码值 DN 可以表示为

$$n_{\mathrm{DN}}=\sqrt{n_{\mathrm{DN_s}}^2+n_{\mathrm{DN_d}}^2+n_{\mathrm{DN_rst}}^2+n_{\mathrm{DN_read}}^2} \quad (1)$$

式中，$n_{\mathrm{DN_s}}$ 为光子噪声 DN 值，$n_{\mathrm{DN_d}}$ 为暗电流噪声 DN 值，$n_{\mathrm{DN_rst}}$ 为复位噪声 DN 值，$n_{\mathrm{DN_read}}$ 为读出电路噪声 DN 值。

实测噪声情况采用 RMS 噪声表征，在无入射信号的条件下连续曝光多次，随机选取一行像素开窗，对当前行的每一个像素求取均方根误差，再对这

一行像素均方根误差求均值，用于估计探测器在当前曝光时间下焦平面阵列的 RMS 噪声[9-10]。

1.1 暗电流

暗电流是指由于物理器件存在的各种寄生效应，在无光照条件下，像素单元产生的电荷。暗电流在像素阵列各处不完全相同，对于含有积分功能的像素单元来说，暗电流所造成的固定图形噪声与积分时间成正比，当长时间的积分单元被采用时，这种类型的噪声就变成了影响图像信号质量的主要因素。对星等较高的星斑成像时需要较长的积分时间，且对成像质量有较高要求，因此暗电流电子的积累是必须考虑的因素。

1.2 像素的饱和与溢出模糊

对于 CMOS 传感器而言，入射信号强度与光生电子数在一定范围内成线性关系，当光信号超过输入上限，光电效应将不再呈现线性，像素单元最终会饱和而不再进行光电转换。满阱容量可以表征光信号的输入上限[11]，当入射光子数大于像素满阱容量时，像素单元的光电子会向相邻像素溢出，从而产生溢出模糊，直接影响后续的质心提取。

本实验使用的探测器基本参数如表 1 所示。

表 1　探测器参数

项目	指标
输出数据	16 通道 LVDS
规模	2 048×2 048
像素尺寸/μm^2	5.5×5.5
工作模式	全局曝光
满阱电子数/ke^-	11
读出噪声电子数	14 e^-@11 ke^-（满阱）
ADC/bit	12
Clk_in/M	5～48

1.3 星斑有效成像范围

如图 2 所示，恒星星斑在探测器焦平面成像时存在最佳读出范围，亚像元质心算法能够有效计算出理想成像效果的恒星目标的质心位置。超出最佳读出范围上限会出现像素饱和，低于最佳读出范围下限会使得信号淹没在噪声中，两种情况都会导致星斑质心的提取精度下降。

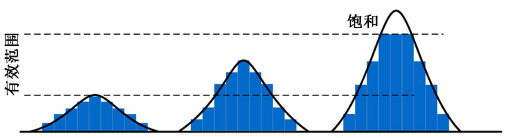


图 2　恒星成像有效范围

对于读出上限而言，其主要限制因素为像素满阱容量，当入射光信号接近或超过一定上限时，光生电子数与入射光强度不在最佳线性范围内或处于饱和状态而向邻近像素溢出电子，导致星斑质心的解算结果出现偏移；对于读出下限而言，其主要影响因素为暗电流与入射信号的大小关系，即信噪比阈值 SNR_th，当星点目标的信噪比大于该阈值时认为该星点目标能被探测，进而可以提取星点质心。

不同星等的恒星亮度不同，为保证焦平面上的成像星斑在有效范围内，必须对探测器的积分时间做出相应调整。

2　星点信号理论模型

导航星星光通过望远镜光学系统由快摆镜反射至主光学焦面和精细导星仪进行星图获取和姿态信息解算，实时获取视轴指向。星图成像与提取过程属于小目标探测，星点到达探测器的目标尺寸较小，在 CMOS 靶面所占像素单元较少，因而对成像系统的噪声十分敏感。

对于空间探测器而言，星空背景能量较低，在大气层外的等效视星等为 23[12]，CMOS 图像探测器需要获取的信号是恒星星光，这类特殊的成像环境和信号尺寸较小的探测目标，需要对成像系统进行合理评估。根据明暗程度可以将恒星分为不同的星等，星等与恒星信号能量的关系可以通过推算获得，星斑在 CMOS 焦面的成像尺寸一般为 5×5 像素点的矩形，将恒星视为无穷远点光源，实际光学系统对点光源所成的像不是理想的几何点，而是扩散的弥散像斑。恒星被分为 O，B，A，F，G，K，M 等不同的光谱类型，不同光谱类型使相同星等恒星的辐射出射度不同，为了计算探测器获得的恒星星点能量，使用视星等 M_v 进行分析，通过计算可以求得探测器产生的总电子数，建立如下数学模型：

$$E_m = E_0 \cdot 2.512^{-m} \tag{2}$$

$$\Phi_c = \tau \cdot E_m \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \tag{3}$$

星等 $M_v = m$ 的恒星目标，将其辐射能量 E_m 作为原始输入信号，其中 $E_0 = 2.96 \times 10^{-14}$ W/mm^2 为视星等 $M_v = 0$ 时的辐射照度。式中，Φ_c 为 CMOS 探测器像面采集到的辐射通量，τ 表示光学系统透过率，D 表示光学系统有效孔径。

成像时星点信号弥散到 5×5 的像素范围，考虑星斑符合二维高斯分布[13-14]，星点目标在焦面成像像元的能量占比为 $\rho(i,j)$，某一像素点的信号能量 $S_{M_v(i,j)}$ 和星空背景 $B_{(i,j)}$ 可表示为

$$S_{M_\nu(i,j)}=\rho_{(i,j)}\cdot\tau\cdot E_0\cdot 2.512^{-m_s}\cdot\frac{\pi}{4}\left(\frac{D}{d}\right)^2\cdot a^2\cdot T\cdot\eta\cdot\frac{1}{h\nu} \tag{4}$$

$$B_{(i,j)}=\tau\cdot E_0\cdot 2.512^{-m_b}\cdot\frac{\pi}{4}a^2\cdot T\cdot\eta\cdot\frac{1}{h\nu} \tag{5}$$

其中，m_s 为目标视星等，m_b 为星空背景等效星等，a 为像元尺寸，d 为星斑直径，单个光子的能量可以由光子波长计算得出，普朗克常数 $h=6.626\ 070\ 15\times10^{-34}$ J/s，ν 代表光子频率，η 为 CMOS 探测器量子效率，T 为积分时间。能量占比 ρ 采用二维高斯分布权重，高斯弥散半径 σ 表示点扩散函数的散焦程度，取 $\sigma=0.671$ 可以得到相应的权重矩阵。已知星点能量的 99.73%集中在 3σ 范围内，视 3σ 为光斑半径[15-16]，中心像素的权重 $\rho=\frac{1}{2\pi\sigma^2}=0.353\ 5$。

遥感仪器的信噪比定义为在一定的输入强度条件下探测器响应值与无输入信号条件下测量值的比值[11,17]，本文采用信噪比定义：

$$SNR=\frac{S}{N}=\frac{S}{\sqrt{S+B+N}} \tag{6}$$

其中，S 为焦面对恒星信号的响应电子数，B 为焦面对星空背景信号的响应电子数，N 为 CMOS 图像探测器总噪声，本文主要针对星斑中心点像素的信噪比进行计算。

3 测试与分析

暗电流对图像质量的影响在低光照小目标条件下尤其明显，本文对无光照条件下的读出码值进行测量。在测试过程中，探测器工作频率在 40 MHz，积分时间为 0.1 s，无光照条件下连续 100 帧成像，随机选取一行 2 048 个像素开窗并记录测试结果，然后绘制曲线图[18]。某一个像素点暗电流读出码值的变化情况如图 3，可以求得该像素点暗电流平均码值为 823，计算 RMS 噪声随曝光时间的变化情况，绘制得图 4。

探测器灵敏度主要由以下两因素决定：一是被光电二极管收集的光生载流子数量，即通常所述光电二极管的量子效率（Quantum Efficiency，η）与填充因子（Fill Factor，F_F）的乘积，其值越高表明在相同入射光条件下能够收集到的光生载流子越多；另一个因素是转换增益，即每个收集到的光生载流子被转换为多少信号电压。根据探测器手册提供的量子效率实测曲线，求得在 400～850 nm 波长范围内的平均量子效率约为 0.65，取波长 $\lambda=625$ nm，由于实验所用探测器含微透镜，使其填充因子可以近似等效为 100%。

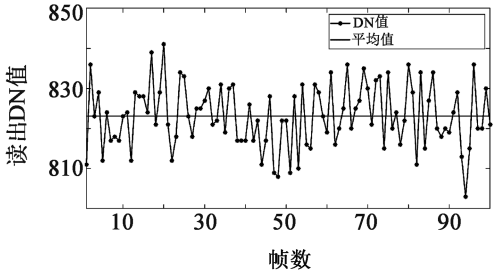


图 3 某像素点连续 100 帧暗电流读出码值

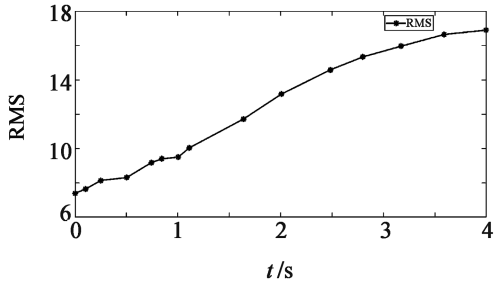


图 4 RMS 噪声随曝光时间的变化曲线

为简化计算过程，本文统一使用噪声码值 $N=850$，信号码值 S 下限取噪声码值的 0.1 倍，即 85，上限取满阱时读出码值的 0.8 倍，即 3 276[19]。针对视场角 4.668°、有效孔径 75 mm 的光学系统，结合实际测量的噪声信息和星点光斑模型的像素点信号能量分布，通过式(4)，(5)及信噪比式(6)的定义求得。

表 2 不同星等最佳积分时间范围

星等	积分时间下限/ms	积分时间上限/ms
6	3.13	117.78
7	7.87	295.87
8	19.76	743.23
9	49.64	1 866.99
10	124.71	4 689.88
11	313.27	11 780.98
12	786.93	29 593.81

导星仪常用的质心提取算法需要保证视场内有 3～5 颗有效星，视场星点数计算公式为

$$N_{FOV}=\frac{2\pi-4\arccos\left(\sin^2\frac{FOV}{2}\right)}{4\pi}\cdot N_{M_\nu} \tag{7}$$

$$N_{M_\nu}=6.57e^{1.08M_\nu} \tag{8}$$

通过经验公式(8)可以求得恒星在全天球分布的总

量随星等变化的统计结果，成像时将获得亮度大于(星等小于)一定星等的星，星等的选择直接与星敏感器的性能和积分时间有关，见表 2，对于视星等小于等于 7 的亮星而言，$N_{FOV}=6.66$，即视场范围内存在的可被成像的星斑数约为七颗。结合表 2 给出的积分时间范围，可以看出，积分时间越长信噪比越高，积分时间上限时的信噪比达到 51。

4　结论

本文通过合理分析得出不同星等在此探测器条件下获取有效星点的积分时间范围，保证视场范围内有效星点数稳定在合适区间，从而进一步设计导星仪成像过程中探测器工作参数的自适应调整。论证了小型 CMOS 图像探测器星点探测的可行性，符合精细导星仪 CMOS 器件轻量化、小型化和高性能的发展趋势，为小型 CMOS 图像探测器星点获取设计方案提供了依据。

参考文献：

[1] Taniwaki S, Ohkami Y. Spacecraft attitude rate determination from star trackers based on spatial velocimeter [J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2003, 46(152): 74-80.

[2] 刘昌举，张　靖，李毅强，等. 全局快门 CMOS 图像传感器研究进展[J]. 半导体光电，2016，37(3)：303-308.
Liu Changju, Zhang Jing, Li Yiqiang, et al. Progress in global shutter CMOS image sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(3): 303-308.

[3] 刘莉萍. 红外焦平面读出电路技术及发展趋势[J]. 激光与红外，2007，37(7)：13-15.
Liu Liping. Status and trend of the readout circuit technology for IRFPA[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(7): 13-15.

[4] 刘传明，姚立斌. 红外焦平面探测器数字读出电路研究[J]. 红外技术，2012，34(3)：125-133.
Liu Chuanming, Yao Libin. Study on digital readout circuit for infrared FPA detectors[J]. Infrared Technology, 2012, 34(3): 125-133.

[5] 白丕绩，姚立斌. 第三代红外焦平面探测器读出电路[J]. 红外技术，2015，37(2)：89-96.
Bai Piji, Yao Libin. Read out integrated circuit for third-generation infrared focal plane detector [J]. Infrared Technology, 2015, 37(2): 89-96.

[6] 裴志军. 高性能 CMOS 图像传感器设计技术研究[D]. 天津：天津大学，2004.
Pei Zhijun. A study of design technology for CMOS image sensor with high performance[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.

[7] 饶睿坚，来新泉，李玉山. CMOS 图像传感芯片的成像技术[J]. 微电子学，2001，31(4)：272-275.
Rao Ruijian, Lai Xinquan, Li Yushan. Techniques for CMOS imaging chips[J]. Microelectronics, 2001, 31(4): 272-275.

[8] Hancock B R, Stirbl R C, Cunningham T J, et al. CMOS active pixel sensor specific performance effects on star tracker/imager position accuracy[C]//Proc. SPIE, 2001, 4284: 10.1117/12.426872.

[9] 郑扬帆，尹达一，李清灵，等. 基于低噪声 CMOS 图像传感器的成像电路设计与实现[J]. 电子设计工程，2018，26(4)：188-193.
Zheng Yangfan, Yin Dayi, Li Qingling, et al. The design and implementation of imaging circuit based on low-noise CMOS image sensor[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(4): 188-193.

[10] 樊香所，徐智勇，张建林. 改进粒子滤波的弱小目标跟踪[J]. 光电工程，2018，45(8)：14-23.
Fan Xiangsuo, Xu Zhiyong, Zhang Jianlin. Dim small target tracking based on improved particle filter [J]. Guangdian Gongcheng/Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(8): 14-23.

[11] 黄富祥，郭俊柏，冯小虎. 闪电成像仪虚警率和探测率模拟计算[J]. 光子学报，2009，38(12)：3116-3120.
Huang Fuxiang, Guo Junbo, Feng Xiaohu. Simulating calculation of lightning detection efficiency and false alarm rate for lightning imagery on geo-satellite [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(12): 3116-3120.

[12] 李学夔，郝志航，李　杰，等. 星敏感器的星点定位方法研究[J]. 电子器件，2004，27(4)：571-574.
Li Xuekui, Hao Zhihang, Li Jie, et al. The research on the method of the star's position determination of the star sensor [J]. J. of Electron Devices, 2004, 27(4): 571-574.

[13] Winick K A. Cramér-Rao lower bounds on the performance of charge-coupled-device optical position estimators[J]. J. of the Optical Society of America A, 1986, 3(11): 1809-1815.

[14] 郑天宇，尹达一. 单次扫描星斑质心提取算法及 FPGA 验证[J]. 现代电子技术，2018，41(14)：19-23.
Zheng Tianyu, Yin Dayi. Star spot centroid extraction algorithm with a single scan and its FPGA verification [J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(14): 19-23.

[15] 杨　君，张　涛，宋靖雁，等. 星点质心亚像元定位的高精度误差补偿法[J]. 光学精密工程，2010，18(4)：1002-1010.
Yang Jun, Zhang Tao, Song Jingyan, et al. High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location[J]. Optics & Precision Engineering, 2010, 18(4): 1002-1010.

[16] 曹　阳，李保权，李海涛，等. 基于星点像重采样的星敏感器高精度质心算法[J]. 光学学报，2019，39(7)：133-141.
Cao Yang, Li Baoquan, Li Haitao, et al. High-accuracy star sensor centroid algorithm based on star image resampling[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 133-141.

(下转第 732 页)

次，考虑到红外与可见光图像间结构信息更相似，对传统 PC 模型进行改进以获得更敏感的频率扩展加权函数，利用改进的 PC 模型得到更准确的特征描述。实验结果显示，本文算法对多种场景的图像均可获得更多正确匹配对，并具有较高的配准精度，算法的鲁棒性更强。

参考文献：

[1] Zitova B, Flusser J. Image registration methods: A survey [J]. Image & Vision Computing, 2003, 21(11): 977-1000.

[2] 张锐娟，张建奇，杨 翠. 基于 SURF 的图像配准方法研究[J]. 红外与激光工程，2009，38(1)：160-165.
Zhang Ruijuan, Zhang Jianqi, Yang Cui. Image registration approach based on SURF[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(1): 160-165.

[3] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. Inter. J. of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.

[4] Li Q, Wang G, Liu J, et al. Robust scale-invariant feature matching for remote sensing image registration[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Lett., 2009, 6(2): 287-291.

[5] Alcantarilla P F, Bartoli A, Davison A J. KAZE features [C]// Proc. of European Conf. on Computer Vision (ECCV), 2012.

[6] Ma W, Wen Z, Wu Y, et al. Remote sensing image registration with modified SIFT and enhanced feature matching [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2016, 14(1): 3-7.

[7] Zhang Q, Shen X, Xu L, et al. Rolling guidance filter[C]// Proc. of European Conf. on Computer Vision, 2014: 815-830.

[8] Shi J. Good feature to track[C]// IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 1994.

[9] Kovesi P. Image features from phase congruency[J]. J. of Computer Vision Research, 1999, 1(3): 2-27.

[10] Harris C G, Stephens M J. A combined corner and edge detector[C]// Proc. of Alvey Vision Conf., 1988: 147-152.

[11] 刁麓弘. 图像处理中的相位信息研究与应用[D]. 北京：中国科学院计算技术研究所，2007.
Diao Luhong. Research and application of phase information in image processing [D]. Beijing: Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, 2007.

[12] Han J, Pauwels E, Zeeuw P D. Visible and infrared image registration employing line-based geometric analysis[C]// Proc. of Inter. Conf. on Computational Intelligence for Multimedia Understanding, 2012: 114-125.

[13] Cristhian A, Angel S, Ricardo T. LGHD: A feature descriptor for matching across non-linear intensity variations [C]// Proc. of the 2015 IEEE Inter. Conf. on Image Processing (ICIP), 2015: 178-181.

[14] Jiang Xingyu, Ma Jiayi, Xiao Guobao, et al. A review of multimodal image matching: Methods and applications[C]// Information Fusion, 2021, 73: 22-71.

作者简介：

占祥慧(1995－)，女，硕士研究生，主要研究方向为图像配准；

徐智勇(1970－)，男，硕士，研究员，主要从事数字图像处理方面的研究。

(上接第 725 页)

[17] 张长城，杨德贵，王宏强. 红外图像中弱小目标检测前跟踪算法研究综述[J]. 激光与红外，2007，37(2)：104-107.
Zhang Changcheng, Yang Degui, Wang Hongqiang. Algorithm surveys for dim targets track-before-detect in infrared image [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(2): 104-107.

[18] 房陈岩，黄小仙，尹达一. 氙灯积分球光源起伏对紫外系统定标影响[J]. 光电工程，2016，43(9)：20-25.
Fang Chenyan, Huang Xiaoxian, Yin Dayi. The influence of light source's fluctuation of xenon lamp integrating sphere on ultraviolet system calibration [J]. Opto-Electronic Engin., 2016, 43(9): 20-25.

[19] 张元涛，柴孟阳，孙德新，等. 全局快门 sCMOS 图像传感器数字 TDI 微光成像技术[J]. 光学学报，2018，38(9)：144-151.
Zhang Yuantao, Chai Mengyang, Sun Dexin, et al. Digital TDI technology based on global shutter sCMOS image sensor for low-light-level imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 144-151.

作者简介：

王佳怡(1997－)，女，硕士研究生，主要研究方向为 CMOS 探测器成像技术；

尹达一(1976－)，男，博士，研究员，博士生导师，主要从事空间紫外成像和光谱技术、空间光电遥感精密机械和自动控制、空间高精度稳像控制技术等方面的研究。