

卷帘快门对数字域TDI成像的影响分析

陶淑苹 金 光

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 数字域时间延迟积分(TDI)互补金属氧化物半导体(CMOS)成像以其成本低、功耗小、操作灵活等优势,近几年逐渐引起研究关注。然而CMOS传感器的卷帘快门存在运动失真,为了深入研究其对数字域TDI的影响,结合卷帘快门工作原理,建立了卷帘快门效应对数字域TDI引起的像移及调制传递函数(MTF)下降的数学模型。并结合推导模型开展了预估分析和验证实验。结果表明:卷帘快门效应对数字域TDI算法带来较大的影响;读出时间越长像移量越大、MTF下降越严重;另外行周期越短影响也越严重,其中行周期从200 us变为100 us时,对应的数字域TDI图像MTF从0.6144下降为0.4807。

关键词 成像系统;互补金属氧化物半导体;图像传感器;卷帘快门;数字域;时间延迟积分

中图分类号 TP386.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0311001

Influence Analysis on the Rolling Shutter for Time Delay and Integration in Digital Domain

Tao Shuping Jin Guang

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Time delay and integration (TDI) in digital domain with the complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) sensor has low cost, low power consumption, flexible operation and other advantages, it has attracted much research attention in recent years. However, the rolling shutter of the CMOS sensor produces distortion for imaging on moving object. In order to study the impact of the rolling shutter on TDI in digital domain, the mathematical model of image motion and modulation transfer function (MTF) decline induced by the rolling shutter effect on TDI in digital domain is established, combining with the principle of the rolling shutter. And the estimation analysis and confirmatory experiment are carried out combining with the derivation model. The results show that the rolling shutter bring a large affect on TDI in digital domain; the image motion gets larger and MTF declines more serious as the readout time gets longer; in addition, the influence gets more serious as the line period gets shorter, when the line period goes from 200 us to 100 us, the corresponding MTF of the images generated by TDI in digital domain decreases from 0.6144 to 0.4807.

Key words imaging systems; complementary metal- oxide- semiconductor; image sensor; rolling shutter; digital domain; time delay and integration

OCIS codes 110.4280; 110.2960; 040.5160

1 引言

数字域时间延迟积分(TDI)是一种借助现场可编程门阵列(FPGA)、外部存储器等传感器外部设备对模数转换后信号完成时间延迟积分操作的一种新型TDI成像方式,因为TDI的过程发生于数字域,所以称为数字域TDI^[1]。数字域TDI脱离传感器内部构造的束缚,适用性、移植性更强,而且不受制于光电传感器器件的制

收稿日期: 2014-08-18; 收到修改稿日期: 2014-10-12

基金项目: 国家863计划(093J32F090)、微小型航天器技术国防重点学科实验室开放基金(HIT.KLOF.MST.201304)

作者简介: 陶淑苹(1986—),女,博士,助理研究员,主要从事空间遥感相机成像电子学方面的研究。

E-mail: taoshuping-163@163.com

造工艺,比较适合我国芯片制造业不发达的现状。数字域TDI相对独立于传感器,因此近几年所开展的研究几乎都围绕电荷耦合器件(CCD)传感器在系统集成度高、成本低、功耗小、抗辐照能力强、图像信息选择读取等方面具有优势的互补金属氧化物半导体(CMOS)传感器展开^[2-6]。Lepage等^[7]提出了基于CMOS传感器实现数字域TDI的思路,并分析了数字域TDI相对于模拟域TDI的巨大优势,预言数字域TDI为未来的发展趋势;文献[8]结合CMOS工作原理提出了具体的卷帘数字域TDI实现方式。

CMOS传感器通常具有同步快门和卷帘快门两种工作方式^[9]。其中卷帘快门相较同步快门具有噪声低、帧频快等优势,但在卷帘快门方式下工作的CMOS传感器的缺点是对运动物体成像产生畸变失真。然而,TDI推扫成像时,传感器与成像目标间必然存在相对运动。因此,卷帘快门会影响数字域TDI成像效果。文献[8]虽提出卷帘数字域TDI算法的数学模型,但未分析卷帘快门对数字域TDI成像的影响。针对该问题,本文结合卷帘快门工作原理和时序,展开卷帘快门对数字域TDI的影响分析研究,并结合成像实验结果进行讨论。

2 卷帘快门工作原理

与胶片式相机的机械式焦平面快门工作原理相似,CMOS传感器卷帘快门工作原理如图1所示,由复位指针和读出指针形成帘布的缝隙,复位指针和读出指针固定移动,即帘布的移动过程中完成图像曝光读出^[1,9]。

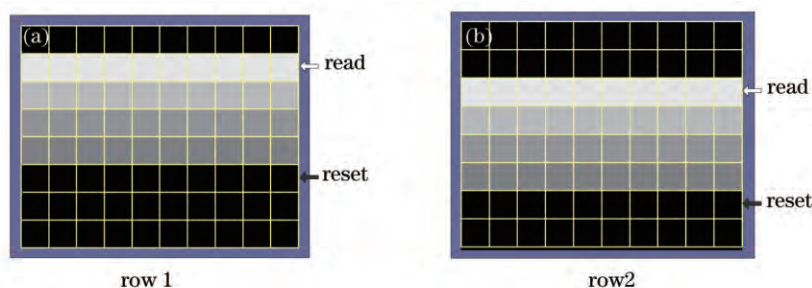


图1 卷帘快门工作原理

Fig.1 Work principle of rolling shutter

显然采用卷帘快门模式工作时,CMOS传感器每一行的采样时间和积分曝光开始时间都是不同的。每行曝光开始必须发生在该行前帧读出完成之后,因此每行曝光积分开始时间亦不相同,正因为如此,当相机与目标景物存在相对运动时会引起拍摄图像失真。将由卷帘快门带来的运动图像失真称之为卷帘快门效应。卷帘快门效应的严重程度与曝光时间和读出时间长短有关。分析可知,当读出时间与积分时间相当甚至更长时,相邻两行曝光开始的时间相差很大,会使得卷帘快门效应显著。

TDI成像过程需要成像系统和目标之间满足一定的相对运动,而且运动方向与扫描方向一致。因此以三角板沿着传感器扫描方向移动为例说明卷帘快门的成像失真。图2左侧为三角板沿着传感器扫描方向移动过程的曝光示意图,右侧为成像结果。可见目标运动方向与传感器扫描方向一致时,会导致目标图像几何拉伸;反之,会导致目标图像的压扁。



图2 卷帘快门扫描方向失真

Fig.2 Distortion in the scanning direction caused by rolling shutter

3 卷帘快门对数字域TDI的影响分析

假设视场内只有1个目标景物点 P ,并由相机对其成像。由透射成像原理得到焦面的对应像点 S , P 与 S

的投影几何关系如图3所示。图中相机静止,目标点以速度 $v(t)$ 相对相机运动,传感器焦面上的各条横线代表各个扫描行,由图3可知,运动目标点在传感器投影成像为一条线。

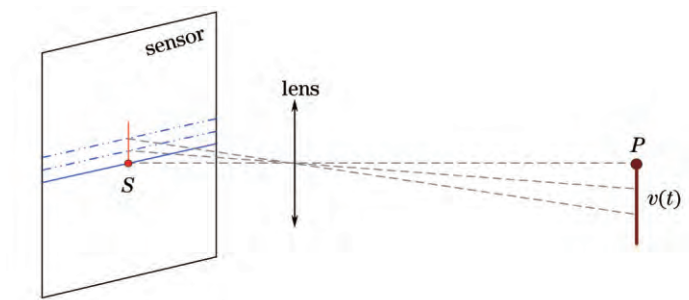


图3 运动目标点在传感器投影成像为线

Fig.3 Projected image of a moving object point becomes to a line

以 $P_k = (p_x, p_y)$ 表示第 k 帧正常图像的目标点对应的成像点位置,相应地失真图像的成像点位置表示为 $S_k = (s_x, s_y)$ 。并假设在时刻 t 相机与目标的相对运动速度为 $v(t) = [v_x(t), v_y(t)]$ 。为了简化分析,假设第 k 帧正常图像的拍摄时刻为 $kT + 0.5T$,而第 k 帧失真图像中像素点 $S_k = (s_x, s_y)$ 的采样时刻为 $kT + s_y$,其中 T 表示 CMOS 图像传感器的帧周期。设在第 k 帧正常图像序列中存在两点 P_{k1} 、 P_{k2} ,同理,在第 k 帧失真图像序列中的两点 S_{k1} 、 S_{k2} 。可以推导出:

$$S_{k2} - S_{k1} = P_{k2} - P_{k1} + \int_{kT+s_{y1}}^{kT+s_{y2}} v(t) dt. \quad (1)$$

显然,因为景物点的采样时刻取决于景物点所投影的扫描行,所以其积分取决于扫描行的垂直位置。当在时间间隔 $(kT + s_{y1}, kT + s_{y2})$ 内相机与目标景物保持相对静止,即 $v(t) = 0$ 时, $S_{k2} - S_{k1} = P_{k2} - P_{k1}$ 不存在卷帘快门效应。另外,若 S_{k1} 与 S_{k2} 在同一扫描行, $s_{y1} = s_{y2}$,仍满足 $S_{k2} - S_{k1} = P_{k2} - P_{k1}$,亦不存在卷帘快门效应。当不满足上述两条件时,则必然会引起卷帘快门效应。对于数字域 TDI 成像,固然不满足上述条件。

进一步分析卷帘快门对数字域 TDI 成像产生的像移。为简化分析,假设不存在偏流误差,即目标景物相对于成像系统只有沿扫描方向的速度分量,而且该速度与 CMOS 传感器的行扫描方向相反。由 TDI 成像原理可以得到地面推扫速度和像面像移速度分别为

$$v_g = \frac{R}{R+H} \times \sqrt{\frac{C_{GM}}{R+H}}, \quad (2)$$

$$v_p = \frac{f}{H} \times \frac{R}{R+H} \times \sqrt{\frac{C_{GM}}{R+H}} = \frac{a}{T_{line}}, \quad (3)$$

式中 R 为地球半径, H 为轨道高度, C_{GM} 为地心引力常数, f 为焦距, a 为像元尺寸, T_{line} 为 TDI 成像行周期,其与卷帘快门的帧周期 $T_{frm,roll}$ 和回程时间 $T_{nicheng}$ 满足关系: $T_{line} = T_{frm,roll} + T_{nicheng}$,在设计中按照最大曝光时间原则选取 $T_{frm,roll}$ 。在一个行周期内,共有 M 行扫描行依次曝光和像素读出,则两相邻行开始曝光的时间间隔为

$$\tau = T_{rbl} + N_{pix} \times \frac{1}{f_s}, \quad (4)$$

式中 T_{rbl} 为行空白时间, N_{pix} 为传感器每行像元数, f_s 为像素读出频率。继而推导出,对于目标点由卷帘快门产生的帧内像移

$$\Delta S_{intra} = M \int_{kT+s_{y1}}^{kT+s_{y2}} v(t) dt = \frac{f}{H} \times \frac{R}{R+H} \times \sqrt{\frac{C_{GM}}{R+H}} \times \left(T_{rbl} + N_{pix} \times \frac{1}{f_s} \right) \times M. \quad (5)$$

且满足

$$\left(T_{rbl} + N_{pix} \times \frac{1}{f_s} \right) \times M \leq T_{line}. \quad (6)$$

该像移会引起成像系统 MTF 下降,其 Nyquist 频率处的 MTF 为

$$f_{MT,roll} = \frac{\sin(\pi \times \Delta S_{intra} \times N_{Nyquist})}{\pi \times \Delta S_{intra} \times N_{Nyquist}}. \quad (7)$$

分别取一行像元数为 2048 和 4096 的情况,计算不同行转移时间条件下的像移失配率和 MTF,结果如图 4 所示。图中粗黑曲线和灰色粗曲线分别代表每行像元数为 2048 时的像移失配率和像移对应的 MTF;细黑曲线和灰色细曲线分别代表每行像元数为 4096 时的像移失配率和像移对应的 MTF。而且图中两类曲线的像素采样频率相同。分析图 4 可知,卷帘快门效应引起的像移会对数字域 TDI 算法带来较大的影响:同样的移动速率(行周期)下,每行读出时间越长则像移量越大,对应引起的 MTF 下降也越严重;对于固定的行读出时间则移动速率越快(行周期越小)产生的像移量越大,MTF 下降越严重。

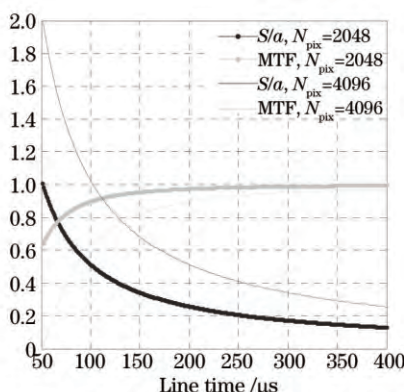


图 4 卷帘快门引起的像移和 MTF 预估结果

Fig.4 Estimation of the image motion and MTF caused by the rolling shutter

另外,不管哪种快门方式,CMOS 传感器光敏元在采集光信号过程中由于目标运动也会产生像移。TDI 推扫成像相当于狭缝扫描成像,像移量为 CMOS 传感器像元尺寸。该像移不可补偿,在 Nyquist 频率处的大小为

$$f_{MT,push} = \frac{\sin(\pi \times a \times N_{Nyquist})}{\pi \times a \times N_{Nyquist}} \approx 0.64. \quad (8)$$

因此,得到卷帘数字域 TDI 总的像移 MTF 计算公式如下

$$f_{MT,image} = f_{MT,roll} \times f_{MT,push}. \quad (9)$$

以实际在轨情况预估卷帘数字域 TDI 的像移 MTF,分别计算 300、400、500、600 km 轨道高度处的不同积分级数情况下的总像移 MTF,结果如图 5 所示。计算中选用 $a=13 \mu\text{m}$, $f=5 \text{ m}$, $\tau=5.0059 \mu\text{s}$ 。对比图 5 各曲线可知:轨道高度越低,卷帘数字域 TDI 算法的像移 MTF 随级数增加的下降越剧烈,因此实际中应尽量避免该类应用。

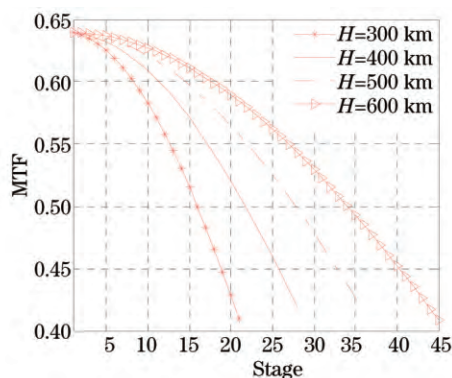


图 5 不同轨道高度的卷帘数字域 TDI MTF 与级数关系

Fig.5 Relationship of MTF caused by rolling TDI in digital domain and the integration stages under different orbit heights

4 实验结果

为了测试验证理论分析,依据卷帘数字域 TDI 算法模型设计基于卷帘快门 CMOS 传感器的数字域 TDI 成像系统,如图 6 所示。系统硬件由成像子板和控制底板两部分组成,成像子板主要包括 CMOS 传感器和时

序驱动电路,控制底板主要包括FPGA、通信模块、数据存储电路、数传电路等。其中FPGA为Xilinx公司的XCV3000;CMOS传感器采用CYPRESS公司的IBIS5-B-1300全色面阵CMOS传感器,该传感器支持卷帘快门和同步快门可选,实验中选用卷帘快门。

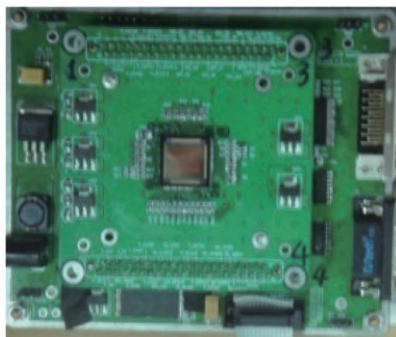


图6 成像电路板

Fig.6 Imaging circuit board

为了定量测试卷帘快门对数字域TDI成像的影响,实验选用等宽明暗条纹图像作为靶标。摆放相机使得传感器运动方向垂直于靶条方向,而卷帘快门扫描方向与传感器运动方向一致,因此卷帘快门会对条纹不同比例明暗部分成像。分别以8、6、4 m成像距离模拟不同轨道高度,对应设置行周期为200、150、100 μs ,计算并调整目标与成像系统间的相对运动速度为1.58、2.10、3.15 m/s。在上述3种行频下,获取图像如图7所示。

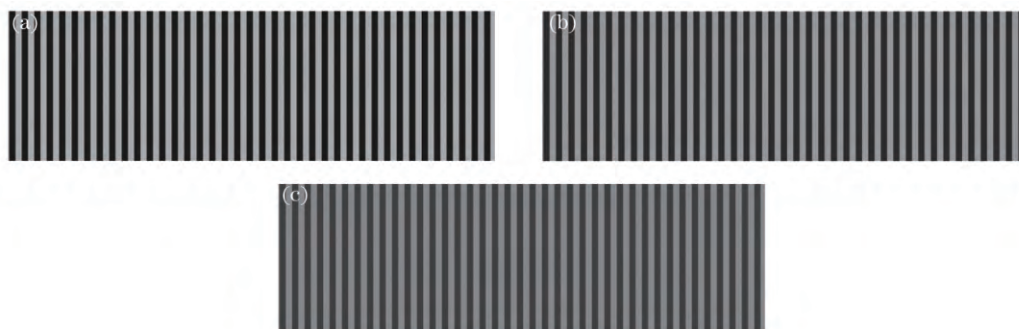


图7 不同行周期的卷帘数字域TDI图像。(a) 200 μs ; (b) 150 μs ; (c) 100 μs

Fig.7 Images based on rolling TDI in digital domain under different line periods. (a) 200 μs ; (b) 150 μs ; (c) 100 μs

MTF与对比度传递函数(CTF)计算公式如下

$$f_{\text{MT}} = \frac{\pi}{4} f_{\text{CT}}, \quad (10)$$

$$f_{\text{CT}} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}. \quad (11)$$

式中 I_{max} 为图像最大灰度值, I_{min} 为最小灰度值。对获取的3种不同TDI行周期条件下的图像,利用(10)式和(11)式即可较容易地计算出各图像的MTF值,如表1所示。

表1 图像MTF计算值

Table 1 Calculated results of the images MTF

Parameter	Line period		
	200	150	100
f_{CT}	0.7823	0.7165	0.6120
f_{MT}	0.6144	0.5627	0.4807

观察图7可以发现随着行频增快,图像逐渐模糊,这是因为卷帘快门使得在不同扫描速度下传感器单次成像的各行所曝光的明暗条纹比例不同,当扫描速度越快时,亮条纹曝光行中暗条纹占的比例越大,此时获得的图像对比度下降。表1三幅图像的MTF结果也表明,随着扫描速度变快,卷帘快门会引起图像MTF降低,实验与理论分析和仿真预估结果相吻合,验证了建立的卷帘快门效应对数字域TDI成像影响数学模型的正确性。

为了进一步验证,开展了对复杂场景目标的成像实验。将相机摆放于成像转台,设置转台速度使目标与成像系统间的相对运动速度分别为 1.5、2.0、3.0 m/s,为满足像移匹配,在上述 3 种扫描速度下分别发送控制指令设置行周期为 210、158、105 μs ,采用 16 级积分对同一目标成像,获取图像如图 8 所示。由图 8 可知,随着转台速度变大,图像逐渐模糊,层次感减弱,而且在扫描方向上存在几何形变。选取图像左下方白色区域刃边计算 3 幅图像 MTF 值,分别为 0.481、0.417、0.326,结果表明对于固定的行读出时间移动速率越快(对应于轨道高度越低,行周期越小)MTF 下降越严重,与图 4 和图 5 理论分析吻合。

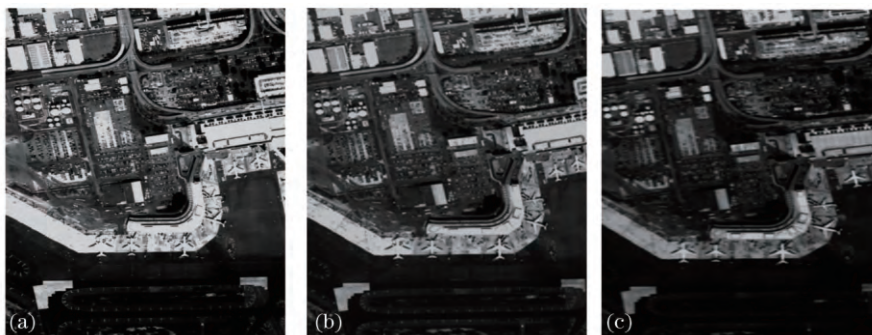


图 8 不同移动速度的卷帘数字域 TDI 图像。(a) 1.5 m/s; (b) 2.0 m/s; (c) 3.0 m/s

Fig.8 Images based on rolling TDI in digital domain under different velocities. (a) 1.5 m/s; (b) 2.0 m/s; (c) 3.0 m/s

5 结 论

针对 CMOS 传感器的卷帘快门效应引起的运动图像失真问题,展开了其对数字域 TDI 成像的影响分析,介绍了卷帘快门的工作原理,推导了卷帘快门引起的数字域 TDI 成像的像移及 MTF 下降数学模型,并对该影响预估分析,开展实验验证。实验结果与理论分析相吻合:不同行频下,卷帘快门都会引起数字域 TDI MTF 下降,行读出时间越长或行周期越小产生的影响越严重,其中行周期从 200 μs 变为 100 μs 时,对应的数字域 TDI 图像 MTF 从 0.6144 下降为 0.4807。该研究可为数字域 TDI 成像系统的设计及方案论证提供参考,并为对失真图像进行校正提供依据。

参 考 文 献

- 1 Tao Shuping, Jin Guang, Qu Hongsong, *et al.*. Design and analysis of CMOS camera based on time delay and integration in digital domain to realize spacial high-resolution imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0411001.
陶淑苹, 金 光, 曲宏松, 等. 实现空间高分辨成像的数字域时间延迟积分 CMOS 相机设计及分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0411001.
- 2 Qu Hongsong, Zhang Ye, Jin Guang. Improvement of performance for CMOS area image sensors by TDI algorithm in digital domain [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1896–1903.
曲宏松, 张 叶, 金 光. 基于数字域 TDI 算法改进面阵 CMOS 图像传感器功能[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(8): 1896–1903.
- 3 G Lepage, D Didier, W Dielsa. CMOS long linear array for space application [C]. *SPIE*, 2006, 6068: 606807.
- 4 B Pain, T Cunningham, G Yang, *et al.*. CMOS image sensors capable of time delayed integration [J]. *NASA Technology Report*, 2001. 04.
- 5 Fu Qiuyu, Lin Qingyu, Zhang Wancheng, *et al.*. A high-speed CMOS image sensor for real-time vision chip [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0828001.
付秋瑜, 林清宇, 张万成, 等. 面向实时视觉芯片的高速 CMOS 图像传感器[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0828001.
- 6 Xiong Ping. Comparison of CCD and CMOS image sensors [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2004, 25(1): 1–4.
熊 平. CCD 与 CMOS 图像传感器特点比较[J]. *半导体光电*, 2004, 25(1): 1–4.
- 7 G Lepage, Jan Bogaerts, Guy Meynants. Time-delay-integration architectures in CMOS image sensors [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56(11): 2524–2532.
- 8 Tao Shuping, Jin Guang, Qu Hongsong, *et al.*. Design of CMOS imaging system based on rolling TDI in digital domain [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2380–2385.
陶淑苹, 金 光, 曲宏松, 等. 采用卷帘数字域 TDI 技术的 CMOS 成像系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2380–2385.
- 9 Liu Zhi, Chai Hua, Li Nana. Shutter mode of CMOS image sensor and its application [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(8): 2017–2023.
刘 智, 柴 华, 李娜娜. CMOS 图像传感器中卷帘式快门特性及其应用[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(8): 2017–2023.

栏目编辑: 苏 岑