

# 一种基于地址-事件表达的实时视觉传感器实现方法

于 璐 姚素英 徐江涛\*

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

**摘要** 为获取高帧频、大动态范围、低数据量的精确视觉信息,提出了一种基于地址-事件表达(AER)的实时视觉 CMOS 传感器实现方法。采用 AER 方式,多模式的行仲裁及实时时间标记,有效减小读出数据量,减小小时域行间信息扭曲;利用像素级光强变化感知电路探测光强变化,双采样脉冲宽度调制(PWM)电路量化光强。仿真结果显示,在 100 lx 光强下,获得最小等效帧频 1000 frame/s,10 lx 光强下为 100 frame/s,静态动态范围大于 133 dB,视频动态范围 48.16 dB,并可实现实时时间标记、多模式仲裁的功能,减小输出数据量 11.61%~42.74%。结果表明,该方法可完成实时视觉信息的采集、处理、输出,适用于高速、高动态范围视觉领域。

**关键词** 传感器;CMOS 图像传感器;实时视觉;地址-事件表达;低输出

中图分类号 TN491 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0128003

## An Implementation Method of Real-Time Vision Sensor Based on Address Event Representation

Yu Lu Yao Suying Xu Jiangtao

(School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** In order to achieve high frame frequency, high dynamic range (DR) and low data quantity of visual information accurately, an implementation method of real-time vision sensor based on address-event representation is proposed. The readout data quantity and time-based information distortions decrease, benefitting from AER, adjustable row arbitration and time stamp. The method can detect light-intensity change by changing detector circuits and quantify the light intensity changes by double sampling pulse width modulation (PWM) circuits. The simulated results show that in the illumination conditions of 100 lx and 10 lx, the minimum equivalent frame frequency is 1000 frame/s and 100 frame/s, respectively. DR can reach 133 dB, and vision DR is 48.16 dB. The output can be decreased by 11.61%~42.74% compared with previous one. It proves that the proposed method can perform real-time optical signal capturing, processing and readout as well as be applied to the field of high-speed and high DR image and vision.

**Key words** sensors; CMOS image sensor; real-time vision; address event representation (AER); low output

**OCIS codes** 040.5160; 110.2970; 330.4270; 330.5310

## 1 引 言

传统的视觉图像采集方式以固定频率采集的“帧”为基础,具有高冗余、高延迟、高噪声、低动态范围和大数据量等缺陷<sup>[1~4]</sup>。基于地址-事件表达(AER)的视觉图像传感器模仿生物视觉的工作机理<sup>[5~7]</sup>,像素异步工作,仅输出光强发生变化像素的

地址和信息,而不是被动依次读出“帧”内每个像素信息,从源头上消除冗余数据,具有场景变化实时动态响应、图像超稀疏表示、事件异步输出等特点,可广泛应用于高速目标跟踪、实时监控、工业自动化和机器人视觉等领域<sup>[8~10]</sup>。

AER 方式可与时间脉冲(TTFS)<sup>[11]</sup>、脉冲宽度

收稿日期: 2012-08-08; 收到修改稿日期: 2012-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(61036004,61076024)资助课题。

作者简介: 于 璐(1987—),女,硕士研究生,主要从事 CMOS 图像传感器设计方面的研究。

E-mail: yuluyouxiang@sina.com

导师简介: 姚素英(1947—),女,教授,博士生导师,主要从事 CMOS 图像传感器方面的研究。E-mail: syyao@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: xujiangtao@tju.edu.cn

调制 (PWM)<sup>[2,12,13]</sup>、脉冲频率调制 (PFM)<sup>[14]</sup> 和 ON/OFF 事件<sup>[8,15]</sup>等时间域像素结构结合,实现异步输出,应用于视觉传感器。但是进行片外时间域量化过程中,输出延时将引起量化误差<sup>[2,12,16]</sup>;采用片内像素单独存储阵列的方式虽然可避免输出延时,但会增加系统开销<sup>[9]</sup>;采用分区处理时间对比方式可减小输出数据量,但小区域内事件发生不同步将带来冗余数据<sup>[17]</sup>。同时,采用片外输出时间标记,标记点为输出数据时间,而不是事件发生时间,不能精确反映光强变化,且在数据输出发生冲突,需要仲裁的情况下,数据与时间的不匹配更加显著。

本文提出了一种基于 AER 方式的实时视觉 CMOS 传感器实现方法,集成了多模式行仲裁方式、实时时间标记功能,可有效减小输出数据量,解决 AER 异步输出方式带来的事件-时间不匹配问题,并具有高帧频、大动态范围(DR)的特点。

## 2 AER 方式原理

AER 方式以仿生神经学为原型,传感器像素阵列内某单元发生特定事件后,输出脉冲信号<sup>[18~20]</sup>。脉冲信号触发外围的地址编码电路编码事件发生地址,并且通过量化脉冲时间间隔或脉冲频率来反映脉冲信号的属性。AER 方式由事件主动触发,各像素间异步工作,真正实现非“帧”图像采集,并且未发生事件的像素无输出,从源头上消除了冗余信息,减小硬件开销、功率消耗,大大提高系统工作速度。

发生特定事件的像素对控制模块发出通信请求,请求获准后输出量为该像素所在坐标位置( $x, y$ )及发生的事件。如图 1 所示,对于一维单一事件异步并行输出,事件以脉冲形式输出,引起其所在行的地址编码器实时输出行地址,后续接收处理电路根据接收到的行地址及接收编码的时间还原事件属性及所在地址。

AER 方式消除冗余数据、减小数据量,在不发

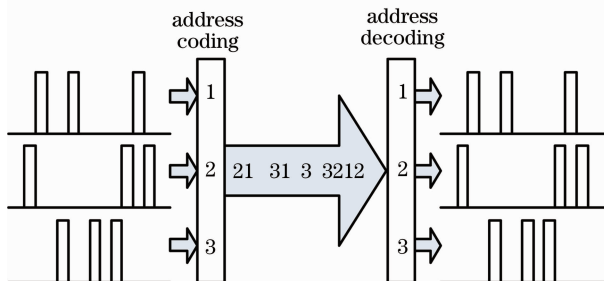


图 1 一维单一事件 AER 方式原理

Fig. 1 Principle of one-dimensional one-event AER

生严重竞争的情况下,不同像素的事件可实时输出,可被认为是一个实时系统。但对于同时发生的传输请求将产生冲突,需要控制模块进行仲裁处理。

## 3 AER 异步 CMOS 视觉传感器结构

### 3.1 像素结构设计

基于 AER 方式的像素结构由感知光强变化的光强变化感知电路 (CD) 和量化光强的双采样 PWM 电路<sup>[21]</sup>两部分组成,其结构及时序逻辑关系如图 2、3 所示。

CD 电路仅负责感知光强是否变化,由光电流探测、比较及放大、输出比较及逻辑修正三部分组成。光电二极管 PD<sub>1</sub> 感知光强变化,放大器 A<sub>1</sub> 的输出端与复位管 M<sub>p</sub> 源极相连,输出电压 V<sub>ph</sub> 可迅速反映光电流变化,并进行保持。V<sub>G</sub> 为复位电压,由 CD 控制电路进行控制。比较及放大电路采用开关电容放大器,开关 S<sub>0</sub> 由事件探测输出信号 CD 及仲裁模块进行控制。放大后的采样差值,分别与正向阈值 V<sub>r</sub> 及负向阈值 V<sub>a</sub> 进行比较,一旦超过阈值即

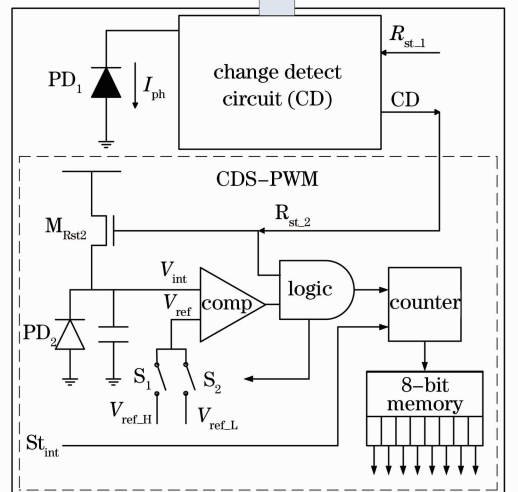
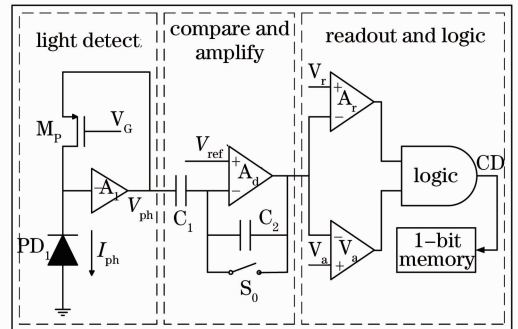


图 2 像素结构

Fig. 2 Schematic architecture of pixels

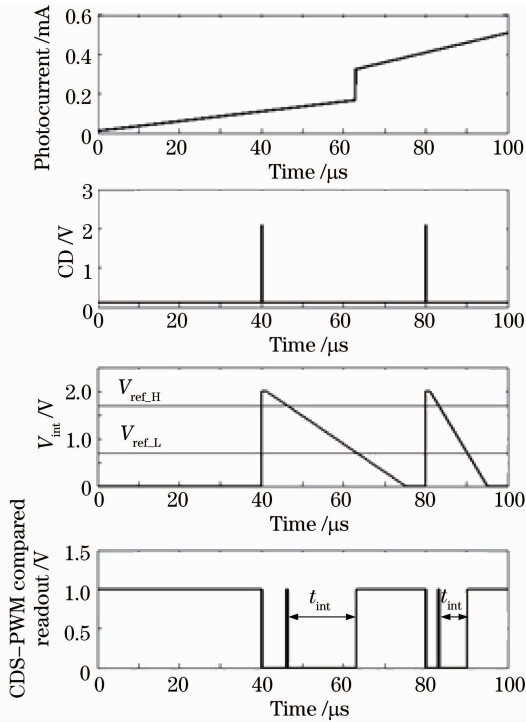


图 3 像素结构时序逻辑关系

Fig. 3 Timing and logical relation of the pixels structure proposed

表示本像素发生光强变化超出阈值范围,需要测量及输出,判断结果存储于 1 bit 存储器中。

双采样 PWM 电路接收到 CD 信号后开始光强量化工作。复位管  $M_{Rst2}$  复位后,光电二极管  $PD_2$  开始曝光。此时,开关  $S_1$  闭合, $S_2$  断开,比较器的负端接高参考电压  $V_{ref,H}$ 。随着曝光的过程, $V_{int}$  电压线性下降,降至  $V_{ref,H}$  时,比较器输出翻转。随后,经像素内部逻辑控制,开关  $S_1$  断开, $S_2$  闭合,比较器的负端接低参考电压  $V_{ref,L}$ 。计数器量化比较器两次翻转的时间差  $t_{int}$ ,将量化结果存储于 8 bit 存储器中,等待输出。

### 3.2 传感器工作原理

本文提出的视觉传感器由像素阵列(128 pixel  $\times$  128 pixel)、CD 控制电路、双采样 PWM 控制电路、行仲裁电路、时间标记电路、行/列地址编码电路和读出电路组成,如图 4 所示。

像素单元由 CD 电路和双采样 PWM 电路组成。CD 电路判断结果存储于像素内 1 bit 存储器中,共用列总线。双采样 PWM 电路量化结果存储于像素内 8 bit 存储器中,经仲裁后按行输出,同样采用列总线共用输出方式。CD\_reset 信号控制各像素 CD 电路的复位,控制信号  $x\_Rst$  为列共用信号。双采样 PWM 控制电路控制各像素中双采样

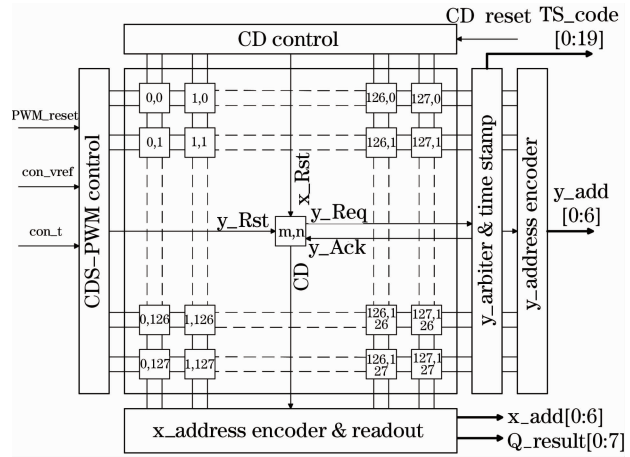


图 4 AER 异步时间域 CMOS 视觉传感器结构框图

Fig. 4 Schematic architecture of the asynchronous temporal AER CMOS vision sensor

PWM 电路的复位及比较器参考电压、计数器时钟模式的转换。通过输入不同的比较器参考高/低电压、计数器时钟周期可实现动态范围的调整。CD 电路和双采样 PWM 电路的复位外部分别设置,这样的好处是当光强变化剧烈时,CD 电路输出频率远大于双采样 PWM 电路量化频率,传感器进入“快照”模式,CD 电路停止工作,转为双采样 PWM 电路同步并行曝光工作方式。

某一像素  $(m, n)$  的 CD 电路检测到光强变化后,将是否需要量化的判断结果存储于像素内 1 bit 存储器中。若结果有效,双采样 PWM 电路量化光强,将结果存于 8 bit 存储器中,并向行仲裁电路发出请求信号  $y\_Req$ 。同时,时间标记电路将接收到的  $y\_Req$  信号进行精确时间标记,标记结果存储于行共用的 20 bit 存储器中。行仲裁电路收到请求信号  $y\_Req$  后,决定输出优先权。假设选定第  $m$  行输出,仲裁电路在向该行发出确认信号  $y\_Ack$  的同时,向行地址编码电路发送行选中信号。行地址编码电路输出第  $m$  行的行地址  $y\_add[0:6]$  及该行中存储的标记时间  $TS\_code[0:19]$ 。第  $m$  行的像素接受确认信号  $y\_Ack$ ,仅当此像素的 CD 判断信号为有效值时,该像素向列地址编码电路发送 CD 判断信号及量化结果,输出 7 bit 列地址  $x\_add[0:6]$  及 8 bit 量化结果  $Q\_result[0:7]$ 。

采用 AER 方式,仅对光强变化超过阈值的像素信息进行输出,从源头上消除了冗余数据的产生;每个像素的工作状态由外部光强“主动”触发,相对于传统“帧”采集模式,规定同步采样周期的“被动”采集,可获得更大的动态帧频及动态范围;通过时间标记反映光强变化的时间点,可精确反映连续视觉

信息。

## 4 动态范围与仲裁模式

### 4.1 动态范围

视觉图像采集的图像质量在动态范围方面有着很大的改进空间,特别在高速图像采集方面,需折衷帧频与视频动态范围的关系。

传统的 CMOS 有源图像传感器中每个像素的曝光时间为定值,动态范围由读出信号大小所限制:

$$r_{DR} = 10 \lg \left( \frac{V_{sat}^2}{V_{dark}^2 + V_{reset}^2 + V_{out}^2} \right), \quad (1)$$

式中  $V_{sat}$  为光电二极管复位电压,  $V_{dark}$ 、 $V_{reset}$ 、 $V_{out}$  分别为暗电流、复位噪声和读出噪声引起的噪声电压。 $r_{DR}$  受到复位电压限制,并且随着工艺尺寸的不断减小,电压随之降低,成为限制传统图像传感器图像质量的瓶颈。而本设计中采用的时域 PWM 方式,  $r_{DR}$  由曝光时间决定,大大提高了动态范围。

PWM 方式中

$$T_{int} = \int_{V_{refL}}^{V_{refH}} \frac{C_{PD}}{I_{ph}} dV_{int} = \frac{\Delta V_{th} \cdot C_{PD}}{I_{ph}}. \quad (2)$$

由量子效率公式,光照强度公式

$$\eta_Q = \frac{I_{ph}/e}{P_0/(h\nu)}, \quad (3)$$

$$P_0 = LA, \quad (4)$$

可得

$$I_{ph} = \frac{\eta_Q P_0}{h\nu} e = LA \frac{\eta_Q e}{h\nu}. \quad (5)$$

由(2)、(5)式得到

$$\gamma_{DR} = 20 \lg \frac{I_{max}}{I_{min}} = 20 \lg \frac{t_{max}}{t_{min}}, \quad (6)$$

式中  $I_{max}$ 、 $I_{min}$  分别为最大可测非饱和光强及最小可测光强,  $I_{min}$  由暗电流决定,  $t_{max}$ 、 $t_{min}$  分别为最长、最短光时间。

由(6)式可知, PWM 方式的动态范围由曝光时间所决定,不受复位电压影响。

图 5 为量子效率  $\eta_Q = 0.7$ , 光电二极管面积  $A = 81 \mu\text{m}^2$ ,  $C_{PD} = 36.98 \text{ fF}$ ,  $I_{dark} = 1 \text{ nA/cm}^2$  条件下曝光时间  $t_{int}$  与光强的关系,其中  $\Delta V_{th}$  为双采样 PWM 电路比较器高/低参考电压的差值。

在同一  $\Delta V_{th}$  下,光强  $1 \text{ lx}$  的曝光时间为  $10^5 \text{ lx}$  下的  $10^5$  倍。为了获得较高的“等效帧频”,在视频采集过程中,同一“等效帧”内的量化精度为

$$\rho_Q = \frac{\Delta V_{th} C_{PD}}{I_{ph0} \times 10^{t_{min}} \times 2^K} = \frac{\Delta V_{th} C_{PD}}{I_{ph0} \times 10^{t_{max}}}, \quad (7)$$

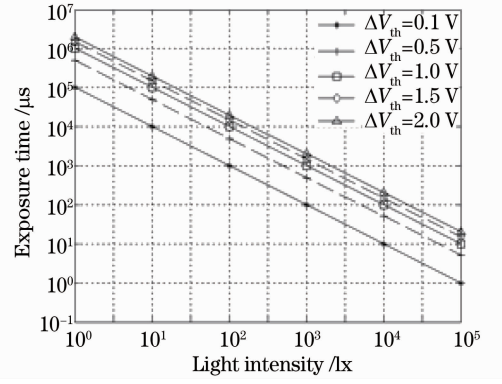


图 5 不同光强,不同  $\Delta V_{th}$  下的曝光时间

Fig. 5 Exposure time in different light intensity and  $\Delta V_{th}$

式中  $I_{max} = 10^{I_{max}}$  为最大可测非饱和光强,  $I_{min} = 10^{I_{min}}$  为最小可测光强,  $K$  为量化位数。

由(7)式可得

$$I_{max} = I_{min} \times 2^K. \quad (8)$$

则一“等效帧”的动态范围为

$$\gamma_{DR} = 20 \lg \frac{I_{max}}{I_{min}} = 20 \lg 2^K. \quad (9)$$

与传统“帧”视频模式不同的是, PWM 量化方式中视频模式下的一“等效帧”动态范围受量化位数  $K$  影响,  $K$  越高,一“等效帧”采集过程中的动态范围越大。

### 4.2 多模式仲裁

基于 AER 方式的视觉传感器每个像素曝光、量化、输出的过程异步,且事件发生频率不固定,无法预测。若同时发生的传输请求产生冲突,各像素产生竞争,则需要控制模块进行仲裁处理。根据特征信息提取、高速拍摄和高速目标跟踪等不同需求,可采用不同的仲裁方式,动态分配带宽,提高数据的输出速度。

本设计采用轮权仲裁、中间区域优先、事件集中优先三种模式进行仲裁,满足对实时视觉获取的不同需求:

1) 轮权仲裁:遵循“先进先出”的原则,每次仲裁按照第一行依次至最后一行的顺序决定优先权。轮权仲裁可使每行优先权相对平均。但是,即使一行中只有一个事件也需输出,输出时间较长。适用于需要对全景信息采集,但对帧频要求较低的视觉图像采集领域;

2) 中间区域优先:优先输出中间  $N$  行,上下边缘各行输出优先权低,每  $K$  ( $K > 1$ ) 个“等效帧”输出一次。其优势在于弱化对周围固定环境信息的采

集,减小无用信息。但是,采用此方式信息采集不完全,在优先区域外出现的变化不能及时采集。适用于高速目标跟踪,特别是高速公路安全监测领域;

3) 事件集中优先:根据每行需输出变化像素的个数决定输出优先权,可迅速反映图像主要信息,但光强剧烈变化的像素行会多次占用输出,使其他变化不强的行不能输出。适用于需要快速反映图像变化,但对精确度要求不高的领域。

根据不同需求采用上述不同的仲裁方式,可全面或迅速地获得图像信息。结合时间标记模块,修正时间与输出数据的不匹配,可精确反映连续视觉信息。

表 1 传感器性能指标与其他类似传感器对比

Table 1 Performance comparison of the sensors between different designs

Parameter /s	This paper	Ref. [8]	Ref. [11]	Ref. [13]	Ref. [17]
Sensor array	128×128	128×128	32×32	64×40	64×64
Image processing /bit	8	8	8	10	6
DR /dB	>133 48.16(vision)	120	104	82	---
Min frame rate /(frame/s)	>100(10 lux) >1000(100 lux);	---	30	11.8	---
Sense format /bit	8+2×7	16+2×7	10(without quantization)	10	10+2×6
Time stamp /bit	20	---	---	---	---
Process mode	AER CDS-PWM	AER ON/OFF	TTFS	PWM kernel counter	AER kernel process
Frame based	no	no	yes	yes	no

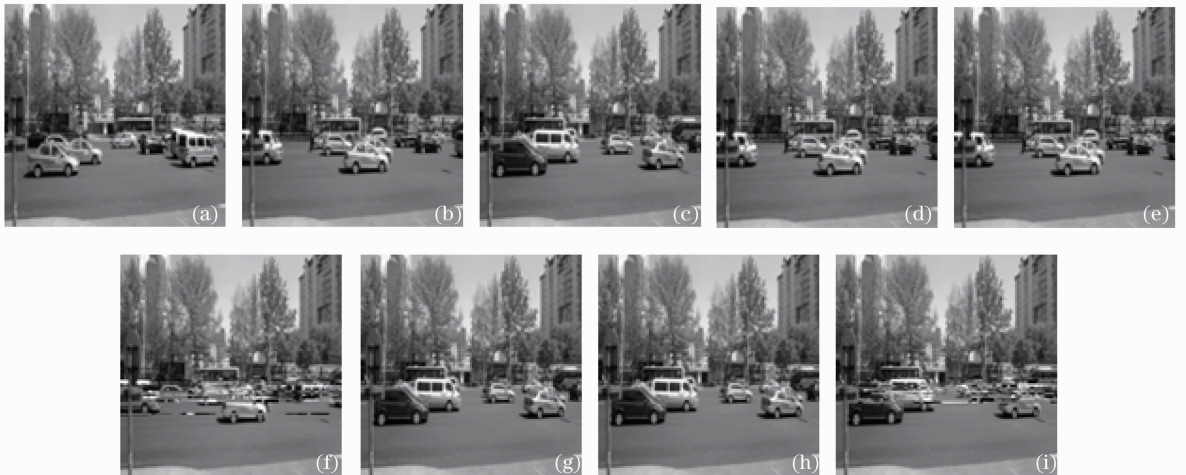


图 6 不同仲裁方式下获得的图像信息。(a)~(c)分别为原始图像的第 1,2,3 帧;(d),(g)分别为轮权仲裁下获得的第 2,3 帧图像;(e),(h)分别为中间区域优先模式下获得的第 2,3 帧图像;(f),(i)分别为事件集中优先模式下获得的第 2,3 帧图像

Fig. 6 Images in different arbitrations. (a)~(c) are the first, second, third of original image, respectively; (d), (g) are the second and third frame in rotation arbitration, respectively; (e), (h) are the second and third frame in intermediary-areas priority, respectively; (f), (i) are the second and third frame in events-focus priority, respectively

## 5 仿真结果及分析对比

采用 Matlab 软件/Simulink 对本文提出的基于 AER 方式的实时视觉传感器实现方法进行仿真。传感器结构包括 128 pixel×128 pixel 阵列、CD 控制电路、双采样 PWM 控制电路、行仲裁电路、时间标记电路、行/列地址编码电路、读出电路,采用 8 bit 量化精度。在 100 lx 光强下,获得最小等效帧频 1000 frame/s,10 lx 光强下为 100 frame/s,静态动态范围大于 133 dB,视频动态范围 48.16 dB,可满足高速视觉图像获取的需求。主要参数如表 1 所示。

通过拍摄公路汽车行驶图像,表示视觉图像信息的输入过程。这类图像特点为背景信息变化小,且不作为图像采集主要对象,图像的重要信息集中于横向特定区域。图 6(a)~(c)分别为等时间间隔采集的图像信息,事件发生率(即需要量化输出的像素数量/像素阵列总数)为 88.59%,88.10%。

图 6(d)、(g)为在轮权仲裁(Rotation arbitration)下获得的第二、第三“等效帧”图像。完整输出全部图像信息,但输出数据量最大,占用全部输出带宽。图 6(e)、(h)为在中间区域优先模式(Intermediary-areas priority)下获得的图像。优先输出中间 80 行,上下边缘各 24 行输出优先权低。

表 2 不同仲裁方式对比

Table 2 Comparison between different arbitrations

	Row output / %	Rate of pixel output / %		Image accuracy / %		Average reduction rate of output / %
		Second frame	Third frame	Second frame	Third frame	
Rotation arbitration	100.00	88.59	88.10	100.00	100.00	11.66
Intermediary-areas priority	62.50	56.52	58.01	70.32	95.01	42.74
Events-focus priority	93.75	76.59	73.89	93.71	93.69	26.26

## 6 结 论

本文以 AER 方式为基础,提出了一种实时视觉传感器实现方法。理论分析和仿真结果表明,该方法可在图像采集源头消除冗余信息,实现事件驱动、异步输出,获得较高的可调动态范围及等效帧频,并可实现多模式仲裁方式,实时对输出信息进行量化和精确时间标记。结果表明,该实现方法适用于高动态范围、高速图像采集和高速图像数据传输等领域。

## 参 考 文 献

- 1 E. Culurciello, R. Etienne-Cummings, K. A. Boahen. Biomorphic digital image sensor [J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2003, **38**(2): 281~294
- 2 C. Posch, D. Matolin, R. Wohlgenannt. A QVGA 143 dB dynamic range frame-free PWM image sensor with lossless pixel-level video compression and time-domain CDS [J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2011, **46**(1): 259~275
- 3 Lang Junwei, Wang Yueming, Wang Jianyu. Applications of high sensitivity APS CMOS sensors for imaging spectrometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0711003
- 郎均慰,王跃明,王建宇.高灵敏度 APS CMOS 图像传感器光谱探测技术研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(7): 0711003
- 4 Deng Rouhan, Yan Yi, Yu Jinjin *et al.*. Analysis and reduction of pixel noise in CMOS active pixel sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(5): 050401
- 邓若汉,严奕,于金金等. CMOS 有源像素传感器像素级噪声的分析与抑制[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(5): 050401
- 5 U. Mallik, M. Clapp, E. Choi *et al.*. Temporal change threshold detection imager [C]. San Francisco: IEEE

中间区域优先输出行数 62.5%,与原始图像对比,图像准确率动态浮动,由原图像信息决定,输出信息量最小。图 6(f)、(i)为在事件集中优先模式(Events-focus priority)下获得的图像。按行事件数量由多到少优先权输出,且仅输出前 93.75%行,忽略微小变化。与原图像对比,图像准确率为 93.71%,能够较准确反映图像信息,输出信息量较小。表 2 为上述仲裁方式对比。

根据对图像质量或输出“等效帧频”的要求,可采用不同的仲裁模式,全面或快速地获取视觉图像信息。

- International Solid-State Circuits Conference, 2005. 362~363
- 6 Y. M. Chi, U. Mallik, M. A. Clapp *et al.*. CMOS camera with in-pixel temporal change detection and ADC [J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2007, **42**(10): 2187~2196
- 7 S. C. Liu, T. Delbruck. Neuromorphic sensory systems [J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 2010, **20**(3): 288~295
- 8 P. Lichtsteiner, C. Posch, T. Delbruck. A 128×128 120 dB 15  $\mu$ s latency asynchronous temporal contrast vision sensor [J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2008, **43**(2): 566~576
- 9 D. G. Chen, A. Bermak, Y. T. Chi. A low-complexity image compression algorithm for address-event representation (AER) PWM image sensors [C]. Rio de Janeiro: IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2011. 2825~2828
- 10 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
- 11 X. C. Guo, X. Qi, J. Harris. A time-to-first-spike CMOS image sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2007, **7**(8): 1165~1175
- 12 D. Matolin, R. Wohlgenannt, M. Litzenberger *et al.*. A load-balancing readout method for large event-based PWM imaging arrays [C]. Paris: IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2010. 361~364
- 13 Meng-Ting Chung, Chih-Cheng Hsieh. A 0.5 V 4.95  $\mu$ W 11.8 fps PWM CMOS imager with 82 dB dynamic range and 0.055% fixed-pattern noise [C]. San Francisco: IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers, 2012. 114~116
- 14 D. Chen, D. Matolin, A. Bermak. Pulse-modulation imaging-review and performance analysis [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2011, **5**(1): 64~82
- 15 P. Lichtsteiner, C. Posch, T. Delbruck. A 128×128 120 dB 30 mW asynchronous vision sensor that responds to relative intensity change [C]. San Francisco: IEEE International Solid-

- State Circuits Conference Digest of Technical Papers, 2006. 2060~2069
- 16 C. Posch, D. Matolin, R. Wohlgenannt. High-DR frame-free PWM imaging with asynchronous AER intensity encoding and focal-plane temporal redundancy suppression[C]. Paris: IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2010. 2430~2433
- 17 L. Camunas-Mesa, C. Zamarreno-Ramos, A. Linares-Barranco *et al.*. An event-driven multi-kernel convolution processor module for event-driven vision sensors[J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2012, **47**(2): 504~517
- 18 J. A. Lenero-Bardallo, T. Serrano-Gotarredona, B. Linares-Barranco. Dynamic-range ambient-light-independent calibrated signed-spatial-contrast AER retina with 0.1-ms latency and optional[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2010, **57**(11): 2632~2643
- 19 E. Culurciello, R. Etienne-Cummings, K. Boahen. A biomorphic digital image sensor [J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2003, **38**(2): 281~294
- 20 K. A. Boahen. Point-to-point connectivity between neuromorphic chips using address events[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2000, **47**(5): 416~434
- 21 D. Matolin, C. Posch, R. Wohlgenannt. True correlated double sampling and comparator design for time-based image sensors [C]. Taiwan: *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2009. 1269~1272

栏目编辑：何卓铭