

Cámara USB para un sensor de visión selectiva guiada por cambios

Fernando Pardo, Jose A. Boluda, y Francisco Vegara¹

Resumen— Un sensor de visión selectiva guiada por cambios no envía imágenes, sino que en cada instante envía el píxel que más haya cambiado desde la última vez que se leyó. Cada píxel funciona independiente del resto y se lee cuando su cambio acumulado sea el más representativo en comparación a los demás. Este tipo de visión es bastante diferente al tradicional basado en imágenes y requiere de un hardware específico para el control del sensor y captura de la información visual. En este artículo se explica este tipo de visión, funcionamiento del sensor y diseño de la cámara para obtener la información visual del entorno.

Palabras clave— Selective Change Driven (SCD) vision, Visión por Eventos, Cámaras de Vídeo.

I. INTRODUCCIÓN

LOS sistemas de visión artificial comúnmente utilizados están basados en la captura de imágenes o secuencias de imágenes. Esto no es extraño pues el concepto de imagen es algo que se inventó hace ya cientos de años con las primeras cámaras oscuras predecesoras de las cámaras fotográficas. Los primeros pasos en visión artificial se dieron precisamente en el análisis estático de imágenes, es decir, el procesado de la información contenida en una imagen o fotografía.

Con posterioridad a la fotografía, se inventó el cine para poder representar la información visual en función del tiempo. En este caso, la visión artificial también heredó el formato de su predecesor mecánico, de manera que incluso hoy en día, el análisis de la información visual consiste en el procesado de secuencias de fotografías o imágenes.

En los sistemas biológicos, con un desarrollo evolutivo mucho más extenso en el tiempo que la actual visión artificial, apenas encontramos similitudes con el concepto de imagen. En su lugar, los foto-receptores o píxeles, funcionan de manera independiente y cada uno envía su información en cualquier instante. Es el flujo de píxeles lo que se procesa y no de imágenes. A pesar de eso, se pueden construir imágenes juntando la información recibida hasta un momento dado, pero no parece que los sistemas biológicos trabajen con esa representación estática, sino que van respondiendo a eventos visuales según van llegando.

Esto no significa que los sistemas biológicos sean mejores, en algunos aspectos, a los artificiales, pero sí que sirven para poner de manifiesto que otra forma de procesar la información es posible, sin necesidad de imágenes, y que además puede ser útil en determinadas circunstancias.

Existen muchos sensores de visión que han utilizado los sistemas biológicos como inspiración. En casi todos se utilizan eventos como mecanismo de comunicación. A principios de los noventa se introdujo el concepto AER (Address Event Representation) para enviar la dirección del píxel que había producido el evento [1]. Algunos sensores tienen como objetivo imitar el comportamiento de los sistemas visuales como el humano [2]. Otros en cambio toman ventaja del funcionamiento de estos sistemas biológicos para obtener sensores con un rendimiento varios órdenes de magnitud por encima de los sistemas biológicos o los artificiales convencionales [3].

El sensor SCD (Selective Change Driven), utilizado en la cámara descrita en este artículo, también se inspira en los sistemas biológicos pero trata de utilizar la tecnología actual para obtener un sistema con mayor rendimiento y facilidad de uso.

El principio en el que se basa este tipo de sensor fue introducido en [4] y es sencillo:

Un sensor SCD envía, bajo demanda, las coordenadas y nivel de gris del píxel que ha sufrido un mayor cambio de iluminación desde la última vez que se leyó ese píxel.

Este principio presenta implicaciones importantes, algunas de ellas no encontradas en otros sensores similares. En primer lugar, el flujo de píxeles no viene controlado por la aparición en cualquier instante de eventos como en AER, sino que la unidad de procesamiento es quien decide cuándo se envía el píxel. Esto es bueno en un sistema artificial pues la unidad procesadora es quien ejecuta el algoritmo de visión y la que debe fijar la tasa de píxeles según la tarea que esté realizando. Además permite una utilización más efectiva de los recursos.

En lugar de eventos, que en cualquier caso son muy interesantes pues nos indican dónde debemos fijarnos para procesar, lo que hace el sensor SCD es enviar el píxel que probablemente sea más significativo en cada instante. En visión dinámica, los píxeles más interesantes suelen ser aquellos que han sufrido un cambio mayor pues son los que más información pueden aportar al algoritmo de visión implementado.

De esta manera, el sensor SCD (y la mayoría de sensores de visión basados en eventos) envía la información más significativa en cada instante realizando una reducción selectiva de la información a procesar. Aquellos píxeles de la escena que no cambian no se envían y no ocupan ni ancho de banda ni recursos de procesamiento. Eso sí, los algoritmos de visión deben adaptarse a este tipo de procesamiento en el cual no hay un flujo de imágenes sino de píxeles.

¹Dpto. de Informàtica, Universitat de València, 46100 Burjassot, Valencia, SPAIN e-mail: (see <http://tapec.uv.es/>).

Este sensor SCD también se distingue de otros similares pues envía el nivel gris o iluminación junto con la dirección del píxel. Además, esta información de iluminación tiene la misma resolución temporal que la de acceso al píxel, característica que no encontramos en los pocos sensores de eventos que también pueden enviar el nivel de gris [5], [6].

Existen numerosos algoritmos de estimación de movimiento que ya han sido adaptados a la estrategia basada en eventos. Estos algoritmos prescinden de la información del nivel de iluminación pues muy pocos sensores entregan esta información junto con las coordenadas del evento. Ya en algunos trabajos se ha destacado que contar con la información del nivel de gris, puede ser útil para realizar una mejor estimación del movimiento mediante la segmentación [7]. Precisamente la cámara SCD presentada en este artículo permitiría dicha segmentación, ya que es capaz de entregar el nivel de iluminación junto con el evento con la misma resolución temporal.

II. SENSOR DE VISIÓN GUIADO POR CAMBIOS (SCD)

Existe una primera versión de sensor con estrategia SCD [8], [9], sin embargo, al estar basado en la integración de la foto-corriente durante un tiempo fijo (como la mayoría de sensores convencionales) no se aprovechaban al máximo las prestaciones que la visión guiada por cambios puede ofrecer. Aun así, este sensor ya permitía mejorar la velocidad de seguimiento de objetos en casi dos órdenes de magnitud comparado con un sistema convencional de adquisición de imágenes [10], [11].

Recientemente se acaba de desarrollar un nuevo sensor SCD con mayor resolución espacial que el anterior y mayor velocidad de funcionamiento. Este nuevo sensor es el utilizado en la cámara SCD que explica en este artículo. Una fotografía del sensor se muestra en la figura 1.

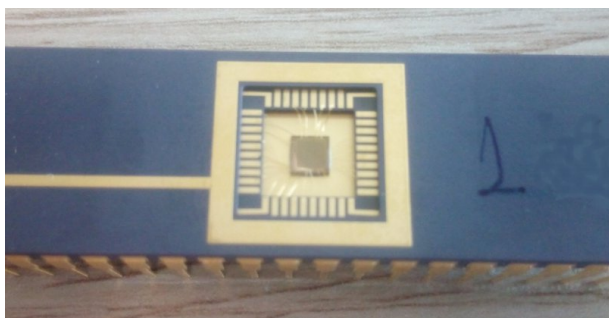


Fig. 1. Fotografía del sensor SCD

La mayor diferencia se encuentra en el tipo de célula de adquisición de luz. Se trata de un transistor que trabaja en inversión débil, transformando directamente la corriente generada en un fotodiodo, en una tensión que tiene una dependencia logarítmica [12]. Esta célula puede ser leída en cualquier momento pues no requiere de ningún tiempo de integración. Es por tanto ideal para que

cada píxel pueda funcionar independientemente del resto como en un sistema de visión biológico. El inconveniente de esta célula es la baja relación entre señal y ruido que hace que la calidad de las imágenes no sea demasiado buena.

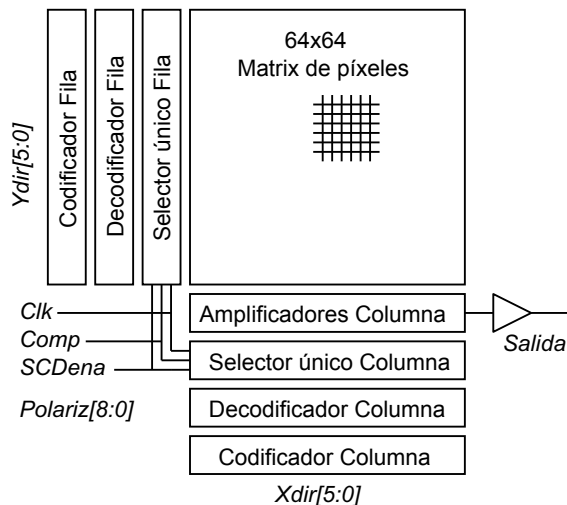


Fig. 2. Diagrama de bloques del sensor SCD

La figura 2 muestra los bloques principales de que consta el sensor SCD. En cursiva se muestran las entradas y salidas del sensor que luego serán útiles para realizar la cámara. El sensor consta de una matriz de 64×64 píxeles. Todos los píxeles forman parte de un gran circuito Ganador-Toma-Todo (WTA, *Winner-Take-All*) donde se compite continuamente para ver qué píxel ha tenido el mayor cambio. El circuito WTA es eficaz con pocos competidores, pero si hay muchos con similares cambios desde que se leyeron, es posible que se acabe seleccionando varios píxeles en lugar de uno. Para conseguir seleccionar un único píxel, los píxeles que han sido seleccionados avisan en su columna que hay un posible ganador. Si hay varios seleccionados es fácil que haya más de una columna activa. En este caso entra en acción el circuito que en la figura viene marcado como Selector único Columna, que es el encargado de seleccionar sólo una columna de entre las que estén activas; las columnas están priorizadas de manera que una columna activa de mayor prioridad inhibe al resto. El píxel que detecta que su columna no ha sido inhibida, señala su correspondiente fila, repitiéndose el mismo proceso pero esta vez por filas. Al final, sólo queda activa una fila y una columna, sin embargo, el píxel seleccionado todavía no se va a leer pues el sensor se espera a la señal de reloj. En el momento se produce un pulso en el reloj *Clk* se capturan la fila y columna seleccionadas y se lee el píxel, que envía su nivel de gris hacia los amplificadores de columna y éstos al amplificador de *Salida*. Los amplificadores de columna son en realidad *buffers* de ganancia unidad, que además de enviar el valor analógico al amplificador de salida, envían este valor de vuelta al chip, para que pueda cargar el condensador que almacena el último valor leído. De esta manera el

valor actual y el valor almacenado son idénticos, la diferencia entre ambos es nula, y este píxel ya no volverá a ser leído hasta que tenga de nuevo una diferencia de las más grandes del sensor.

La dirección del píxel seleccionado se muestra en los buses $Ydir[5:0]$ y $Xdir[5:0]$ tras convertir con los codificadores la columna y fila del píxel. Es interesante destacar que junto a los circuitos codificadores nos encontramos los circuitos decodificadores, pues este sensor puede funcionar también como un sensor de imágenes convencional de acceso aleatorio (como una RAM síncrona). Es decir, el procesador puede poner la dirección en el bus, activar el reloj, y obtener así el valor del nivel de gris del píxel correspondiente a esa dirección. El modo de direccionamiento se decide mediante la entrada $SCDena$; si está activa se utiliza el modo SCD, y si no, el modo convencional que permite capturar imágenes enteras accediendo secuencialmente a todos los píxeles de la matriz.

Existe en el sensor la señal de competición ($Comp$) que sirve para indicarle a los circuitos que realicen la competición anteriormente descrita. La competición tiene lugar de forma muy rápida por lo que el tiempo en que $Comp$ está activo puede ser pequeño; además, es interesante no tener mucho tiempo activa la competición, pues durante este tiempo se pueden producir oscilaciones en el circuito que introducen ruido. El pulso de reloj debe quedar dentro del pulso de $Comp$ que siempre debe ser mayor que el de Clk .

Por último se tienen nueve entradas analógicas con un valor de tensión fijo, que sirven para generar las corrientes internas de polarización que necesita el sensor para funcionar. Estas señales vienen indicadas como $Polariz[8:0]$. La tabla I muestra el resumen de los pines del sensor SCD.

TABLA I
ENTRADAS Y SALIDAS DEL CHIP SENSOR SCD

Señal	Función
Vdd, AVdd	Alimentación digital y analógica (1.8 V)
GND, AGND	Tierra digital y analógica
Salida	Salida analógica del nivel de gris
$Xdir[5:0]$	Dirección de la columna
$Ydir[5:0]$	Dirección de la fila
Clk	Reloj de sincronización
Comp	Señal de competición
SCDena	Modo SCD (1=SCD, 0=Convencional)
$Polariz[8:0]$	Tensiones de polarización

III. CÁMARA

Uno de los objetivos del sensor SCD es ofrecer una interfaz sencilla con el elemento procesador de imágenes. Al contrario que otros sensores basados en eventos, el sensor SCD tiene una interfaz síncrona que además viene controlada por la unidad procesadora, es decir, trabaja siempre como esclavo y su control es por tanto más sencillo. Todo esto simplifica bastante la realización de la cámara y programación de su control, siendo el principal problema la alimentación, que en el sensor es de 1.8 voltios mientras que los sistemas microcontroladores se mueven más entre los 3.3 y

5 voltios.

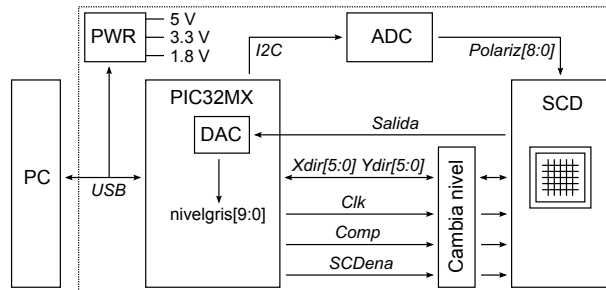


Fig. 3. Diagrama de bloques de la cámara

La figura 3 muestra el diagrama de bloques de la cámara implementada para controlar el sensor y enviar la información a un PC. Se ha utilizado un microcontrolador de la familia PIC32MX de Microchip pues posee una interfaz USB y un convertidor de digital a analógico (DAC) de 10 bits y un tiempo de conversión de $1 \mu s$. El procesador es de 32 bits y funciona a una frecuencia de 80 MHz. Se han probado microcontroladores como el PIC32MZ a 200 MHz y un tiempo de conversión más corto y algunas características mejoran, sin embargo, este micro es muy nuevo y las primeras versiones contienen numerosos errores, especialmente en el convertidor DAC, por lo que se ha utilizado la familia MX que en este momento es más robusta.

El microcontrolador está conectado por un lado al PC mediante el cable USB, que además sirve para alimentar el circuito. Por el otro conecta con el sensor SCD mediante las líneas que ya se han descrito en la sección anterior y que se muestran en la figura 3.

Uno de los principales problemas a la hora de conectar el microcontrolador y el sensor es la diferencia en los niveles lógicos. Por un lado el micro funciona a 3.3 V mientras que el sensor lo hace a 1.8 V. Es necesario por tanto utilizar algún circuito que desplace las señales lógicas de un nivel a otro. En un primer intento se utilizó un cambiador de nivel bidireccional que automáticamente detecta cuál de los dos lados presenta el nivel fuerte y se configura solo. Esto parecía especialmente interesante para el bus de direcciones, ya que dependiendo del modo (convencional o SCD) el bus presenta una dirección u otra. Sin embargo, justo en el modo SCD, las señales de control a través del cambiador empezaban a oscilar fuertemente con lo que el sistema no funcionaba en absoluto. En cambio, en el modo convencional, todo era correcto. Se detectó que el problema era del cambiador de nivel pues se puso un cambiador, también bidireccional, de un fabricante distinto y entonces funcionamiento era el adecuado en ambos modos, aunque en el modo SCD se observaba alguna oscilación de vez en cuando.

No se realizaron pruebas exhaustivas sobre el problema del cambiador bidireccional, pero lo que parece que podría estar ocurriendo es que los rápidos cambios de los buffers de salida, tanto del micro como del sensor, provocan rebotes en las líneas cuyas impedancias no están adaptadas. Estos

rebotes probablemente provocan una realimentación en la circuitería de detección de sentido de los cambiadores, que hace que las oscilaciones se propaguen. Finalmente, la mejor solución fue utilizar cambiadores de nivel con sentido único seleccionable mediante la señal *SCDena*. Con estos cambiadores ya no se detectaron más oscilaciones.

Otra parte importante de la cámara es la generación de las tensiones de polarización. Para esta tarea se han utilizado chips que incluyen en su interior varios convertidores de digital a analógico (DAC) de 8 bits. Cada chip tiene 8 convertidores y se necesitan 9 tensiones, por lo que se utilizaron dos chips obteniéndose 16 salidas analógicas. Con 8 bits y una tensión de referencia de 1.8 voltios, se obtiene una resolución de 7 mV para las tensiones. Las salidas analógicas libres se han aprovechado para usarlas como tensiones de referencia para el resto de convertidores y de esta manera se ha mejorado la resolución. Posteriormente, la experiencia puso de manifiesto que un cambio de 7 mV en las tensiones de polarización apenas cambiaba las características del sensor, por lo que este aumento en la resolución no es necesario, aunque se ha llevado a cabo sin coste adicional.

Los convertidores DAC se programan a través de dos líneas serie con protocolo I2C generadas por el propio micro. El PC envía los valores de polarización a través del interfaz USB y acto seguido el micro programa los DAC.

El programa en el interior del microcontrolador espera a que el PC le envíe una petición para capturar un número determinado de píxeles y una determinada temporización programable. Una vez capturado este número arbitrario de píxeles, el micro los devuelve al PC a través del USB en modo ráfaga para que ocupe el menor tiempo posible. Dado que el sensor SCD tiene un fuerte problema de patrón fijo de ruido (*FPN*, *Fixed-Pattern Noise*) el micro se encarga de restar este patrón fijo para que las imágenes le lleguen limpias al PC.

A. Temporización del sensor

En la figura 4 se muestra el diagrama de tiempos para las señales de control que debe generar el micro. En el modo SCD, que es para el que se diseñó el sensor, el microcontrolador activa inicialmente la señal de competición *Comp*, posteriormente activa el reloj *Clock* y lo desactiva inmediatamente para generar un pulso; por último se desactiva *Comp*. De esta manera sencilla se genera un pulso en *Comp* y, durante éste, otro en *Clk*. Esta sencilla secuencia le dice al sensor que envíe el píxel que más haya cambiado desde la última vez que se leyó. Las direcciones aparecen apenas unos nanosegundos después del flanco de bajada de *Comp*, sin embargo, la señal analógica necesita al menos unos 2 μ s para estabilizarse. Después de este tiempo, el micro puede iniciar la conversión del valor analógico a digital, guardándolo en una memoria para luego enviarlo al PC, o procesarlo inmediatamente. La lectura de las

direcciones se puede hacer en cualquier momento, desde unos nanosegundos después del flanco de bajada de *Comp* hasta el siguiente flanco de subida de *Comp*. Dependiendo del micro, es posible solapar la conversión analógica con la captura y procesado de las direcciones y nivel de gris, obteniéndose una tasa máxima de 0,5 Mpix/s.

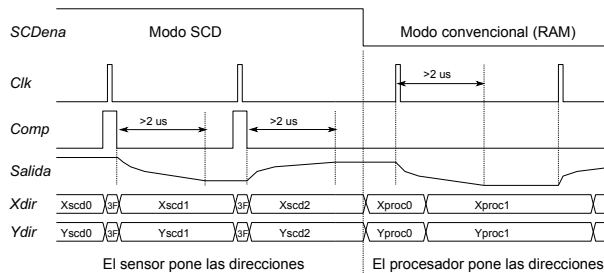


Fig. 4. Diagrama de tiempos de acceso al sensor tanto en el modo SCD como en el convencional (no SCD)

El modo de funcionamiento se puede cambiar en cualquier momento y es casi instantáneo tal como muestra la figura 4. En este modo, el procesador pone en el bus de direcciones, las coordenadas del píxel al que quiere acceder, y luego activa un pulso en el reloj para que el sensor capture esa dirección. Los dos microsegundos que necesita la señal analógica para estabilizarse, empiezan a contar en este caso desde el flanco de subida del reloj. Pasado este tiempo, el micro puede empezar la conversión. Dado que no es necesaria una competición en este modo, pues el píxel ya lo selecciona el micro, la señal *Comp* se mantiene a nivel bajo para evitar oscilaciones internas en el sensor.

IV. EXPERIMENTOS

La cámara funciona y permite realizar experimentos simples de seguimiento de objetos a alta velocidad. En la figura 5 se muestran dos imágenes tomadas con la cámara. A la izquierda aparece una imagen tomada en modo convencional no SCD. La imagen de la derecha no es una imagen exactamente pues se trata de los últimos píxeles leídos en modo SCD. Estos píxeles se han obtenido a partir de un punto negro grueso girando a alta velocidad enfrente de la cámara.



Fig. 5. Imágenes obtenidas con la cámara en modo convencional (izquierda) y en modo SCD (derecha)

Precisamente donde la visión guiada por cambios puede mostrar todas sus ventajas es en el análisis de movimiento a alta velocidad. Para ello se ha

colocado un disco blanco en una multi-herramienta capaz de girar a 33.000 rpm en vacío. En el disco se ha pintado un punto grueso con un rotulador. El montaje del experimento se muestra en la fotografía de la figura 6. A la izquierda de dicha imagen se encuentra la herramienta giratoria con el disco y el punto negro; a la derecha de la misma imagen se aprecia la cámara con su lente de 4 mm y 1/3".

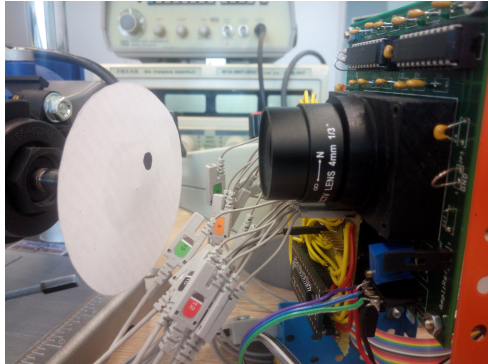


Fig. 6. Fotografía del montaje del experimento de seguimiento. A la izquierda de la imagen se encuentra la herramienta giratoria y a la derecha la cámara SCD

La imagen que se muestra a la derecha de la figura 5, corresponde a la captura de 1.024 píxeles obtenidos en modo SCD, con el disco rotando a la mínima velocidad posible (posteriormente se verá que esa velocidad es de aproximadamente 12.500 rpm). Lo que aparece en blanco significa que no se ha recibido ninguna lectura en esa zona; lo que aparece en gris corresponde a lo capturado como fondo del disco; y lo que está como puntos negros se corresponde con el objeto negro que está rotando. Hay que hacer notar que esto no es realmente una imagen sino los últimos píxeles enviados por el sensor y almacenados en una memoria; hay mucha información que ha ocurrido durante esa *toma* pues hay puntos que primero han pasado a negro, al llegar el objeto, y luego a gris al salir, y sin embargo en la *imagen* aparecen en gris como si no hubiera cambiado.

En estos experimentos, los píxeles se han capturado cada $3,4 \mu s$. Esto quiere decir que la toma mostrada en la figura 5 ha llevado 3,48 ms. La estela de píxeles leídos que se muestra en esa figura es aproximadamente el espacio recorrido por el objeto negro durante ese tiempo.

Para reconstruir la trayectoria seguida por el punto giratorio, se han analizado las coordenadas (x, y) de cada píxel leído junto con su nivel de gris. El nivel de gris se ha utilizado para segmentar los píxeles y seleccionar sólo aquellos pertenecientes al objeto. Estas coordenadas del píxel leído en cada instante, se han dibujado en la gráfica mostrada en la figura 7. En esa figura es posible observar dos funciones sinusoidales, desfasadas 90 grados, lo que indica una trayectoria circular. A la vista de esa gráfica es posible extraer un periodo aproximado de unos 4,8 ms, lo que nos indica una velocidad de rotación de aproximadamente 12.500 rpm. A esta

velocidad de rotación, se ha podido reconstruir la trayectoria con una resolución temporal cercana a los microsegundos. Es interesante destacar que una cámara convencional funcionando a 50 fps necesita unos 20 ms por imagen, que es mucho mayor que los 3,5 ms que se muestran en la figura, es decir, con una cámara convencional sólo se habría podido sacar una imagen del punto, y habría sido imposible decir nada sobre su movimiento. La dispersión que se observa en el trazado de las trayectorias se debe a que el punto ocupa unos 10 píxeles de diámetro.

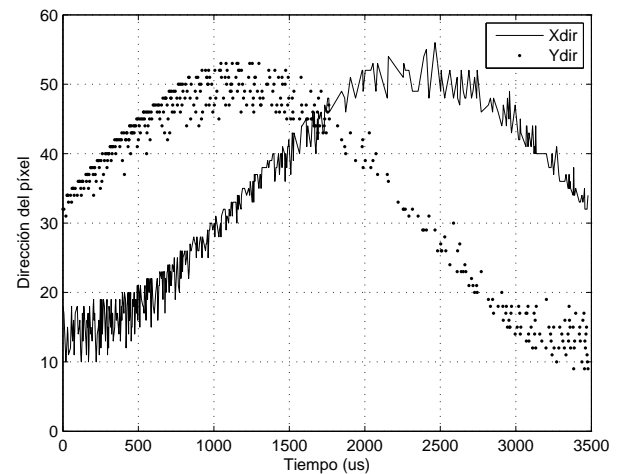


Fig. 7. Coordenadas de los píxeles leídos en modo SCD con la herramienta girando a su velocidad mínima (12.500 rpm aproximadamente)

El mismo experimento se ha repetido con la máquina girando a su máxima velocidad. En este caso el sensor realiza el seguimiento con características similares al anterior a pesar de girar a una velocidad muy superior. La figura 8 muestra el trazado de las direcciones horizontal y vertical igual que se hizo en el experimento anterior. Se observa que hay dos funciones sinusoidales con un periodo inferior al de antes.

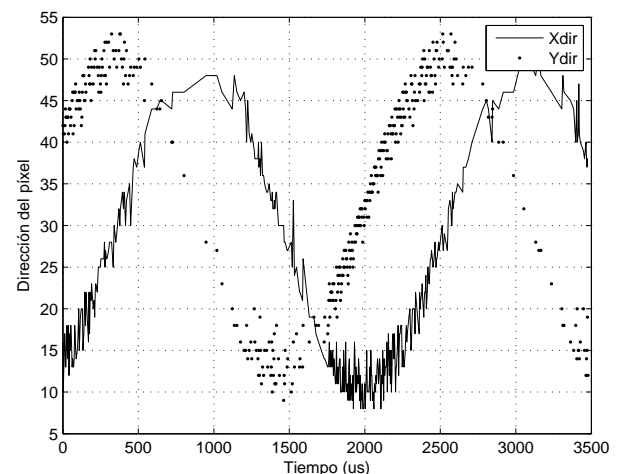


Fig. 8. Coordenadas de los píxeles leídos en modo SCD con la herramienta girando a su velocidad máxima (26.700 rpm aproximadamente)

A la vista de la figura, y analizando los datos capturados, se obtiene que el periodo de giro en

este caso es de unos 2.250 μ s, lo que equivale a una velocidad de unas 26.700 rpm, que es algo menos que lo estipulado por el fabricante de la herramienta, aunque la especificación de 33 Krpm era en vacío (sin carga). Se utilizó esta herramienta pues era el instrumento mecánico con mayor velocidad de giro que se pudo encontrar.

Las coordenadas X e Y de los píxeles también se pueden trazar en tres dimensiones, tal como se muestra en la figura 9. Como el movimiento es circular y el tiempo se ha representado en el eje vertical, lo que se muestra en la figura es una espiral vertical de radio constante similar a un muelle.

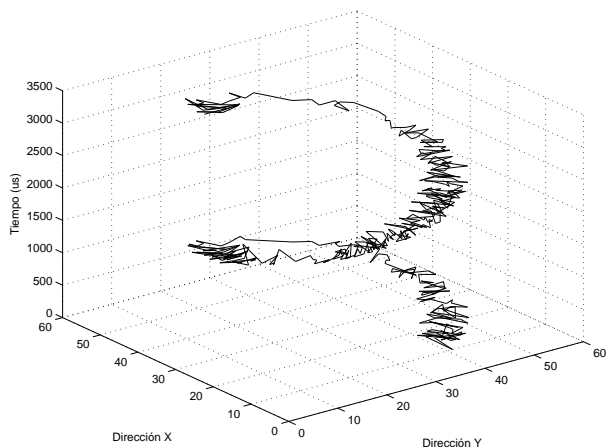


Fig. 9. Coordenadas de los píxeles leídos en modo SCD con la herramienta girando a su velocidad máxima en 3D

El consumo de todo el conjunto es bajo por lo que basta con el propio cable USB para alimentar tanto al micro como al sensor. Este último apenas consume unos 70 mW (sólo el micro a plena carga ya necesita bastante más).

V. CONCLUSIÓN

Se ha presentado una cámara basada en un sensor de visión guiado por cambios. Esta cámara tiene características similares a las de otras basadas en eventos, con la diferencia de que ofrece el nivel de iluminación con la misma resolución temporal que los eventos. Además presenta una interfaz simple, síncrona con el procesador, que es además el que controla el flujo de información. La cámara también ofrece el modo convencional de captura de imágenes. Se ha incluido un experimento de seguimiento de objetos a alta velocidad mostrándose, para esta tarea, muy superior a los sistemas convencionales de adquisición de imágenes, con limitados requisitos de alimentación y espacio, y sin necesidad de recurrir a complejos sistemas de procesamiento.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado mediante el proyecto del Ministerio de Ciencia e Innovación TEC2009-12980.

REFERENCIAS

[1] M. A. Mahowald, *VLSI analogs of neural visual processing: a synthesis of form and function*, Ph.D.

thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, May 1992.

[2] Kareem A. Zaghloul and Kwabena Boahen, "Optic nerve signals in a neuromorphic chip II: Testing and results," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 51, no. 4, pp. 667–675, Apr. 2004.

[3] Teresa Serrano-Gotarredona and Bernabé Linares-Barranco, "A 128x128 1.5% contrast sensitivity 0.9% FPN 3 μ s latency 4 mW asynchronous frame-free dynamic vision sensor using transimpedance preamplifiers," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 48, no. 3, pp. 827–838, Mar. 2013.

[4] Fernando Pardo, Xaro Benavent, Jose A. Boluda, and Francisco Vegara, "Selective change-driven image processing for high-speed motion estimation," in *13th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP'06)*, Sept. 2006, pp. 163–166.

[5] Christoph Posch, Daniel Matolin, and Rainer Wohlgenannt, "A QVGA 143 dB dynamic range frame-free PWM image sensor with lossless pixel-level video compression and time-domain CDS," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 46, no. 1, pp. 259–275, Jan. 2011.

[6] Raphael Berner, Christian Brandli, Minhao Yang, Shih-Chii Liu, and Tobi Delbruck, "A 240x180 10mw 12us latency sparse-output vision sensor for mobile applications," in *Symposia on VLSI Technology and Circuits*, Kyoto, Japan, June 2013, pp. C186–C187.

[7] Francisco Barranco, Cornelia Fermüller, and Yiannis Aloimonos, "Estimación de movimiento con sensores asíncronos basados en eventos," in *V Jornadas de Computación Empotrada, JCE'14*, Valladolid, Spain, Sept. 2014.

[8] Pedro Zuccarello, Fernando Pardo, Alejandro de la Plaza, and Jose A. Boluda, "A 32x32 pixels vision sensor for selective change driven readout strategy," in *Fringe Posters of the 36th European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC 2010)*, Sept. 2010.

[9] Pedro Zuccarello, Fernando Pardo, and Francisco Vegara, "Silicon implementation of a 32x32-pixel vision sensor for selective change driven read-out strategy," in *8th Conference on Ph.D Research in Microelectronics and Electronics (PRIME 2012)*, June 2012, pp. 1–4.

[10] Fernando Pardo, Pedro Zuccarello, Jose A. Boluda, and Francisco Vegara, "Advantages of selective change-driven vision for resource-limited systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 21, no. 10, pp. 1415–1423, Oct. 2011.

[11] Francisco Vegara, Pedro Zuccarello, Jose A. Boluda, and Fernando Pardo, "Taking advantage of selective change driven processing for 3D scanning," *Sensors*, vol. 13, no. 10, pp. 13143–13162, Oct. 2013.

[12] Tobi Delbruck and Carver A. Mead, "Adaptive photoreceptor with wide dynamic range," in *Int. Symposium on Circuits and Systems, ISCAS'94*, London, UK, 1994, vol. 4, pp. 339–342.