

Detección automática de la apertura y el cierre de las flores de *Mammillaria mathildae* Kraehenb. & Krainz

Pablo Vera–Alfaro¹, Joaquín Salas–Rodríguez^{1*}, Roberto Manduchi²,
Emiliano Sánchez–Martínez³

¹Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada,
Instituto Politécnico Nacional, Querétaro, Qro., México

²Department of Computer Engineering, University of California at Santa Cruz,
Santa Cruz, CA 95064, USA

³Jardín Botánico Regional de Cadereyta, Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro,
Cadereyta, Qro., México

*Corresponding author: e–mail, jsalasr@ipn.mx

Received 2th October, 2009; accepted 5th April, 2010

Resumen

Un método para la detección de la condición de apertura y cierre de flores en secuencias de imágenes tomadas con una cámara de video fija se presenta en este documento. El método consistió en determinar el flujo óptico entre pares de imágenes tomadas con una separación de varios minutos para encontrar pequeñas regiones desplazándose que pudieran interpretarse como el movimiento de los pétalos cuando la flor está abriendo o cerrando. Después se estableció un criterio para actualizar las regiones de interés que corresponden a flores abiertas. Se presentan resultados experimentales usando un espécimen de *Mammillaria mathildae*, una especie endémica y en riesgo de extinción en la zona semiárida del estado de Querétaro, México.

Palabras Clave: análisis de imágenes, flujo óptico, regiones de interés, segmentación.

Abstract

We present a method for detecting flowers on image sequences captured with a fixed video camera. We determine the optical flow between pairs of images, which were captured with a separation of several minutes. The optical flow allows us to find small regions that could be interpreted as the motion of petals when the flower is opening or closing. Finally, we establish a criterion for updating regions of interest corresponding to opened flowers. Some experimental results are shown using *Mammillaria mathildae*, an endemic and threatened species from the semiarid zone in the state of Queretaro, Mexico.

Keywords: image analysis, optical flow, regions of interest, segmentation.

Introducción

En el campo de la botánica es de interés el estudio del crecimiento y desarrollo de las plantas y las adaptaciones al ambiente que contribuyen a su sobrevivencia. En el caso de la reproducción de las plantas, la polinización juega un papel fundamental. En años recientes se ha observado la extinción creciente de especies botánicas (Diamond, 2005) y una disminución notable en el número de polinizadores (Stankus, 2008). Estos fenómenos tienen importantes implicaciones para el desarrollo de la vida humana en aspectos básicos tales como la salud y la economía; así, la pérdida de las especies y sus interacciones podrían disparar extinciones en cascada, enfrentándonos ante un potencial colapso de los ecosistemas y su función de soporte de la vida (Hawkins *et al.*, 2008).

De especial interés es el estudio de la flora de las regiones semiáridas ya que, más allá de su aspecto agreste, dichas áreas son ricas en biodiversidad, pero sus ecosistemas son frágiles. Este es el caso, por ejemplo, de las zonas semiáridas del estado de Querétaro, México, que albergan entre 93 y 112 especies descubiertas de cactáceas (Hernández *et al.*, 2004 y Scheinvar, 2004), muchas de ellas endémicas y en peligro de extinción. Por ello, el desarrollo de sistemas de monitoreo de los factores que afectan su dinámica es fundamental para el entendimiento y conservación de los ecosistemas. En el caso de la relación entre polinizadores y plantas, su estudio permite entender el proceso de transformación de las flores a frutos.

Las flores son el elemento primordial, más exitoso, y uno de los más novedosos en la escala evolutiva, que tienen las plantas para generar y proteger a las semillas, *i.e.*, a la nueva generación de plantas. Se estima que existen más de 250,000 especies de plantas con flor en el mundo (Cho *et al.*, 2006). Por ello, tanto por su número como por su variabilidad, el desarrollo de métodos automáticos se ha visto dificultado. Así, los métodos desarrollados han quedado restringidos a situaciones muy acotadas o sistemas interactivos con gran intervención humana. Por ejemplo, Miao *et al.* (2006) proponen un método para el análisis de la forma de las flores aplicado a la clasificación de rosas. Estos investigadores utilizan datos provenientes de imágenes y espectro-colorimetría para clasificar rosas, vistas desde arriba, en: redondas, irregularmente redondas o con forma estrellada. Otros sistemas, principalmente basados en forma y color, requieren de la intervención humana en mucha o poca cuantía. El de Cho y Lim (2006) presentan una para la identificación de flores que se basa en la semejanza de forma y color. Para extraer la forma, permiten que el usuario delinee la forma de la flor. Dentro del contorno así delimitado, ellos extraen información de color. Ambas piezas de información son luego comparadas contra imágenes en la base de datos. Por su parte, Saitoh *et al.* (2004) proponen una heurística para segmentar flores en imágenes en donde la flor está bien enfocada y el fondo desenfocado. En su mayor parte automático, el método requiere asistencia manual cuando la heurística falla. Sin embargo, el número de puntos introducido manualmente es reducido. Para fines de reconocimiento, se utiliza la forma del perfil de la flor y el color encerrado en ese perfil. De forma similar, Zou y Nagy (2004) proponen un sistema interactivo, donde el usuario delinea la forma de la flor, luego un sistema automático ajusta la *rhodonea* o curva de la rosa a la forma delineada, luego algunas características, relacionadas con el color, son extraídas de la curva de la rosa ajustada. El reconocimiento se da entre una lista que el sistema presenta al usuario y la propia selección del usuario respecto al resultado correcto.

Algo diferente involucra la propuesta de Nilsback y Zisserman (2006). Ellos desarrollan un elaborado método para el reconocimiento de flores que usa forma, color y patrones de textura visual. Los tres aspectos son representados por histogramas de ocurrencia, a los que llaman palabras visuales. Usan transformación de características invariantes a escala para describir forma, un modelo de matiz, saturación y brillo para describir color y filtros, campos aleatorios de Markov para describir textura. Los mismos autores refinaron su método de segmentación. Así, en lugar de

comenzar con un modelo general y luego instanciar dependiendo de los datos, Nilsback y Zisserman (2007) proponen, para segmentar flores, comenzar con características de color para dividir fondo de objetos de interés, y luego inicializan medidas de forma; después usan formas genéricas aplicables a un número considerable de clases y puntos de vista. Por nuestro lado, el método que aquí se propone identifica la posición de las flores en la imagen, sin apelar a información sobre el color, la forma, o la textura de las flores. El método se basa en la dinámica que sobre una secuencia de imágenes se observa de una flor al abrir o cerrar sus pétalos. En ese sentido es universal a una gran variedad de flores que experimentan este comportamiento, puede aplicarse para la vigilancia del mecanismo de apertura y cierre de flores de muchas otras especies de Cactaceae que se encuentran en peligro de extinción, las cuales manifiestan el patrón de apertura durante las primeras horas de la mañana y cierre en la tarde (Sánchez *et al.*, 2006) y también pretende complementar los métodos descritos anteriormente.

En este documento se desarrolla un algoritmo para determinar automáticamente, mediante el análisis de una secuencia de imágenes, el momento en que una flor ha abierto o cerrado.

Primero, en la sección 2, se detalla el proceso de obtención del flujo óptico para el caso de las flores. Luego, en la sección 3, se abunda en el método que determina cuando una flor ha abierto o cerrado. En tercer término, se presentan resultados experimentales del método. Finalmente, se discuten los resultados y cómo estos se enmarcan en temas de monitoreo automático de la interacción entre polinizadores y flores más amplios.

Estimación de flujo óptico

El método se basa en el concepto de flujo óptico definido como el patrón de movimiento aparente de objetos, superficies y bordes en una escena visual. Interesa encontrar regiones, en la secuencia de imágenes adquiridas, donde haya bordes que se desplacen hacia fuera o hacia dentro con relación al centro de la región porque pueden interpretarse como los pétalos de una flor abriendo o cerrando, respectivamente. Un método clásico para el cálculo del flujo óptico es el presentado por Lucas y Kanade (1981), el cual usa un algoritmo iterativo para encontrar un vector de desplazamiento de una pequeña región de interés, alrededor de un píxel, entre dos imágenes o cuadros consecutivos en una secuencia dada. La región desplazada en la segunda imagen debe satisfacer un criterio de máxima similitud al compararla con la región en la primera imagen para poder juzgar que corresponde a la misma.

Selección de los píxeles

Los píxeles seleccionados para el cálculo del flujo óptico son los que corresponden a bordes que presentan un cambio de intensidad entre dos imágenes I_k e I_{k+1} de tipo RGB tomadas con una diferencia de tiempo $t_{k+1} - t_k$ de varios minutos. Estas imágenes se convirtieron a niveles de gris promediando los tres canales (rojo, verde y azul). Se calcula $I_d = |I_{k+1} - I_k|$ para obtener el cambio de intensidad de cada píxel y luego se determina $I_r = \sqrt{I_x^2 + I_y^2}$, donde I_x e I_y son las derivadas horizontal y vertical, respectivamente, de I_d , para obtener los bordes de I_d . Se seleccionó el 10 % de los píxeles con valores más altos de I_r . De esta forma se creó una imagen binaria I_s tal que, para un píxel ubicado en (x, y) , se tiene $I_s(x, y) = 1$ si el píxel fue seleccionado e $I_s(x, y) = 0$ en caso contrario.

Determinación del flujo óptico

En esta etapa se usaron las imágenes originales a color I_k e I_{k+1} . Sea $I_k(x, y)$ el color de un píxel con coordenadas (x, y) , el cual es un vector que contiene la intensidad de los tres canales (rojo, verde y azul) y W una región de 3x3 píxeles centrados en (x, y) , se trata de encontrar el vector de desplazamiento $\vec{d} = (d_x, d_y)^T$ que minimice el error dado por:

$$\varepsilon = \sum_W \|I_{k+1}(x_w + d_x, y_w + d_y) - I_k(x_w, y_w)\| \quad \forall (x_w, y_w) \in W. \quad (1)$$

Se usó el método de Lucas–Kanade (1981), el cual considera la información del gradiente de intensidad espacial para dirigir la búsqueda del vector de desplazamiento. El método consiste en encontrar un desplazamiento \vec{d}_{i+1} a partir del valor anterior \vec{d}_i resolviendo, en cada iteración, un sistema que incluye los gradientes $\partial I_{k+1}/\partial x$, $\partial I_{k+1}/\partial y$ y la diferencia $I_k(x_w, y_w) - I_{k+1}(x_w + d_{x,i}, y_w + d_{y,i})$ para cada punto $(x_w, y_w) \in W$. En el presente caso se hicieron 3 iteraciones para cada punto seleccionado y se estableció $\vec{d}_0 = \vec{0}$.

Apertura y cierre de flores

El algoritmo utilizado para detectar flores que están abriendo o cerrando en dos imágenes consecutivas, consta de los siguientes pasos: 1) segmentación inicial de las regiones centrales de desplazamiento y 2) segmentación final de regiones completas de desplazamiento. Adicionalmente, en una secuencia de varias imágenes, se aplicó un criterio de confianza para actualizar las regiones de interés que corresponden a flores abiertas. Inicialmente no se tienen regiones de interés definidas, luego un valor de confianza para cada píxel aumenta o disminuye según se encuentre o no en una región en la que se detecta una flor abriendo y, cuando alcanza un umbral predefinido, se agrega a las regiones de interés. De manera similar, otro valor de confianza para flores cerrando permite eliminar las regiones que ya no son de interés.

Segmentación de las regiones centrales de desplazamiento

Después del cálculo de \vec{d} para cada píxel para el cual $I_s(x, y) = 1$, se definen los arreglos I_h e I_v , como:

$$I_h(x, y) = \begin{cases} 1 & \forall d_x > 0, \\ -1 & \forall d_x < 0, \\ 0 & \forall d_x = 0 \text{ ó } I_s(x, y) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

$$I_v(x, y) = \begin{cases} 1 & \forall d_y > 0, \\ -1 & \forall d_y < 0, \\ 0 & \forall d_y = 0 \text{ ó } I_s(x, y) = 0. \end{cases}$$

I_h e I_v representan las direcciones horizontal y vertical, respectivamente, en que se desplaza cada píxel de una imagen a la siguiente. Luego, para cada una de estas direcciones, se calcula la diferencia entre el número de píxeles que se desplazan en sentido opuesto al punto (x, y) y el de píxeles que se desplazan hacia el mismo punto dentro de un radio r . Se espera que si este punto se encuentra en el centro de una flor abriendo, la diferencia sea positiva y, en el caso de que se

encuentre en el centro de una flor cerrando, sea negativa. Para lo cual se definen $S_{h,1}$, $S_{h,2}$, $S_{v,1}$ y $S_{v,2}$ como:

$$\begin{aligned}
 S_{h,1}(x,y) &= \sum_i I_h(x_i,y_i) \quad \forall x_i \geq x, \quad \sqrt{(x_i-x)^2 + (y_i-y)^2} \leq r, \\
 S_{h,2}(x,y) &= -\sum_i I_h(x_i,y_i) \quad \forall x_i \leq x, \quad \sqrt{(x_i-x)^2 + (y_i-y)^2} \leq r, \\
 S_{v,1}(x,y) &= \sum_i I_v(x_i,y_i) \quad \forall y_i \geq y, \quad \sqrt{(x_i-x)^2 + (y_i-y)^2} \leq r, \\
 S_{v,2}(x,y) &= -\sum_i I_v(x_i,y_i) \quad \forall y_i \leq y, \quad \sqrt{(x_i-x)^2 + (y_i-y)^2} \leq r,
 \end{aligned} \tag{3}$$

y las regiones centrales donde se detectan flores abriendo, se pueden representar en una imagen binaria I_b donde, para cada píxel, se tiene:

$$I_b = \begin{cases} 1 & \forall S_{h,1} \geq \tau, S_{h,2} \geq \tau, S_{v,1} \geq \tau \text{ y } S_{v,2} \geq \tau, \\ 0 & \text{en caso contrario.} \end{cases}, \tag{4}$$

donde τ es un umbral predefinido, y para detectar flores que están cerrando, se tiene:

$$I_b = \begin{cases} 1 & \forall S_{h,1} \leq -\tau, S_{h,2} \leq -\tau, S_{v,1} \leq -\tau \text{ y } S_{v,2} \leq -\tau, \\ 0 & \text{en caso contrario.} \end{cases}, \tag{5}$$

Segmentación final

Para la segmentación definitiva se determinan los centroides de las regiones que aparecen en I_b , para lo cual se promedian las coordenadas (x, y) de cada uno de los puntos que se encuentran en la misma región para los cuales $I_b(x, y) = 1$ y se obtiene el punto (x_0, y_0) para esa región. Luego se determinan qué puntos, dentro de un radio r alrededor de (x_0, y_0) , cumplen con al menos una de las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned}
 x &\geq x_0 \text{ y } S_{h,1} \geq \tau, \\
 x &\leq x_0 \text{ y } S_{h,2} \geq \tau, \\
 y &\geq y_0 \text{ y } S_{v,1} \geq \tau, \\
 y &\leq y_0 \text{ y } S_{v,2} \geq \tau,
 \end{aligned} \tag{6}$$

para segmentar flores abriendo, y para el caso de flores cerrando, se verifican los puntos que cumplen con una de las siguiente condiciones:

$$\begin{aligned}
 x &\geq x_0 \text{ y } S_{h,1} \leq -\tau, \\
 x &\leq x_0 \text{ y } S_{h,2} \leq -\tau, \\
 y &\geq y_0 \text{ y } S_{v,1} \leq -\tau, \\
 y &\leq y_0 \text{ y } S_{v,2} \leq -\tau.
 \end{aligned} \tag{7}$$

De esta forma se expanden las regiones que aparecen en I_b para cubrir el área completa de las flores, al asignar $I_b(x, y) = 1$ a los puntos que satisfacen una de estas condiciones.

Actualizaciones de las regiones de interés

Esta etapa se lleva a cabo cada vez que se adquiere una nueva imagen en una secuencia $\{I_0, I_1, \dots, I_{i-1}, I_i, \dots\}$. Se asigna una imagen binaria I_{ROI} para representar las regiones de interés en la cual, para cada píxel, se tiene un valor inicial de $I_{ROI}(x, y) = 0$ para indicar que aún no se tienen regiones de interés. A partir de las dos imágenes más recientes, se pueden obtener dos imágenes $I_{b,1}$ e $I_{b,2}$, para cada tipo de segmentación (flores abriendo o cerrando, respectivamente). Si para un píxel con coordenadas (x, y) se tiene $I_{b,1}(x, y) = 1$, un valor de confianza de que se encontró una flor abriendo en esa posición aumenta en 1 y, si por el contrario se tiene $I_{b,1}(x, y) = 0$, el valor de confianza disminuye en 1 hasta el mínimo inicial que es de 0. Cuando el valor de confianza alcanza un umbral predefinido τ_c , se establece $I_{ROI}(x, y) = 1$. De manera similar, si se tiene $I_{b,2}(x, y) = 1$, un valor de confianza de que se encontró una flor cerrando aumenta en 1 y si se tiene $I_{b,2}(x, y) = 0$, el valor de confianza disminuye en 1 hasta un mínimo de 0 y cuando alcanza el umbral τ_c , se establece $I_{ROI}(x, y) = 0$.

Se espera que cuando se detecte la apertura de una flor, la región correspondiente se agregue a las regiones de interés existentes en ese momento, sin que sea removida posteriormente cuando el valor de confianza de que está abriendo disminuya al dejar de detectarse el movimiento de los pétalos una vez que la flor permanece abierta, sino hasta que se detecte el cierre de la misma.

Resultados

El método descrito arriba se aplicó en una planta de la especie *Mammillaria mathildae* Kraehenb. & Krainz. Se grabaron imágenes de la planta a una tasa de 10 cuadros por segundo, con una resolución de 640 x 480 píxeles, durante 3 días con objeto de detectar polinizadores y varias de éstas fueron seleccionadas para probar el método de detección de flores a intervalos de 5000 para tener una separación entre imágenes de aproximadamente 8 minutos y su resolución se redujo a 320 x 240 para el análisis. La Figura 1 muestra dos imágenes consecutivas de este grupo, en las que se observan tres flores abriendo, y también muestra la imagen binaria con los píxeles seleccionados por el algoritmo.

La Figura 2 muestra el resultado de la determinación del flujo óptico para estas dos imágenes, en la que se puede apreciar el desplazamiento aparente de cada píxel de una imagen a la otra, en una de las flores. La Figura 3 muestra el resultado de la segmentación de las regiones centrales y de la segmentación final usando los parámetros $r = 20$ y $\tau = 20$ (véase la sección 3a). En la Figura 4 se muestran las regiones de interés, I_{ROI} , después de la apertura y del cierre de las flores usando los parámetros $r = 20$, $\tau = 20$ y $\tau_c = 5$ (véase la sección 3c). También se muestra una imagen de las flores abiertas en la que se marcan los contornos de las regiones de interés.

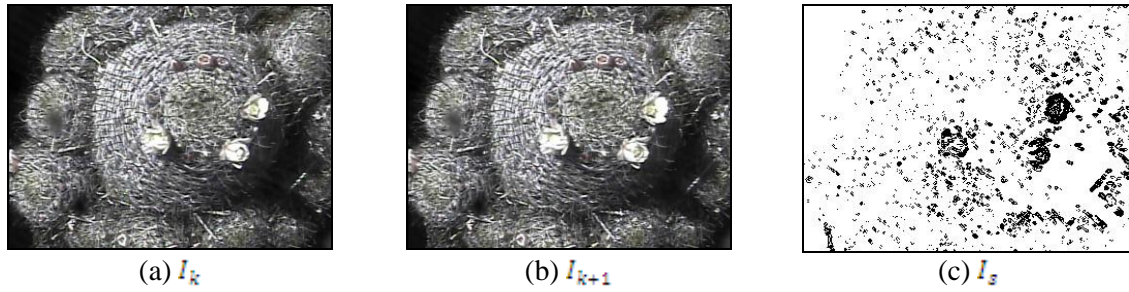


Figura 1. Selección de los píxeles para calcular el flujo óptico.

Figure 1. Selection of pixels for calculating the optical flow.

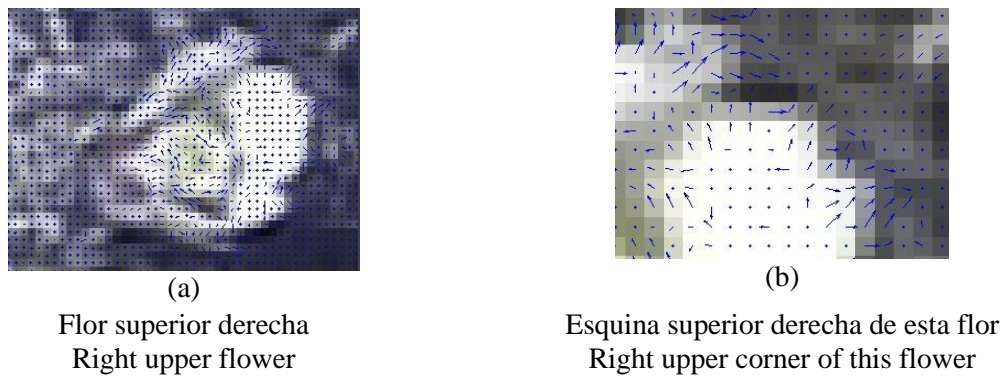


Figura 2. Desplazamiento de los píxeles entre dos imágenes cuando la flor está abriendo.

Figure 2. Pixel displacement between two images when the flower is opening.

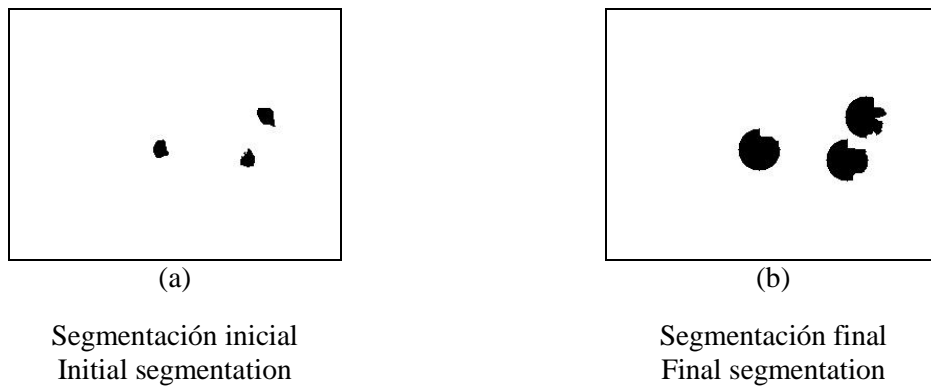


Figura 3. Resultado de la detección entre dos imágenes cuando la flor está abriendo.

Figure 3. Result of detection between two images when the flower is opening.

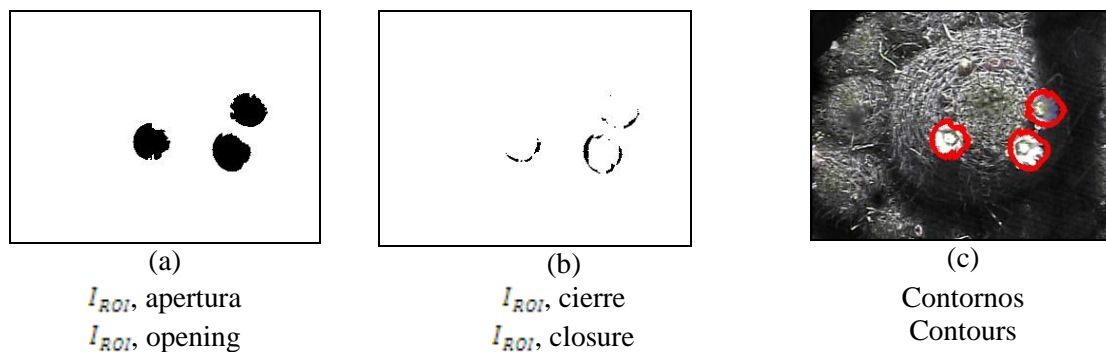


Figura 4. Resultado de la segmentación de las regiones de interés.

Figure 4. Result of segmentation of the regions of interest.

Conclusiones

El método presentado permite la detección de flores que tienen una dinámica de apertura por la mañana y cierre por la tarde. La detección y segmentación de las flores se hizo utilizando una videocámara y herramientas de análisis de imágenes. Entre las ventajas del método se tiene la de que no requiere información previa del color, forma, o textura de las flores.

Entre los problemas que se presentan ocasionalmente en la detección entre un par de imágenes, está la detección de regiones que no corresponden a flores (falsos positivos) y flores que no son detectadas (falsos negativos) debido principalmente a la presencia de sombras que se mueven y a flores que no están orientadas hacia la cámara. Por este motivo se hizo la detección en una secuencia de imágenes y se aplicó el criterio de un umbral de confianza descrito anteriormente, para mejorar el resultado cuando estos problemas no se presentan de manera regular.

Otro problema se debe a que el área que cubre una flor en la imagen cuando cierra es menor que cuando está abierta por lo que algunos puntos no son removidos. Esto se puede resolver, por ejemplo, agregando al algoritmo un criterio para remover regiones que pertenecían a una flor abierta, al identificar que ésta ya cerró.

En cuanto a las posibilidades y futuras oportunidades que tendrán los sistemas de detección automática de la floración, además del seguimiento fenológico y el monitoreo de la relación flor–polinizador, se puede mencionar como ejemplo, el valor de los ‘huertos cronofenológicos’ en los cuales se registran con precisión los ritmos circadianos y estacionales de producción y apertura de flores en distintas especies, con la finalidad de establecer relojes biológicos que informen de los cambios en el clima local y, mediante una red de este tipo de huertos, del cambio climático global.

Referencias

Cho, S.Y. and Lim, P.T. 2006. A novel Virus Infection Clustering for Flower Images Identification. IEEE, International Conference on Pattern Recognition. 2: 1038–1041.

Diamond, J.M. 2005. Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed. The Viking Press. New York, NY, USA. 592 p.

Hawkins, B., Sharrock, S. and Havens, K. 2008. Plants and climate change: which future? Botanic Gardens Conservation International. Richmond, UK.

Hernández, M. H., Gómez–Hinostrosa, C. and B. Goettsch. 2004. Checklist of Chihuahuan Desert Cactaceae. Harvard Papers in Botany 9 (1): 51–68.

Lucas, B.D. and Kanade, T. 1981. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. International joint conference on artificial intelligence 3: 674–679.

Miao, Z., Gandelin, M. H. and Yuan, B. 2006. A new image shape analysis approach and its application to flower shape analysis. Image and Vision Computing 24: 1115–1122.

Nilsback, M.–E. and Zisserman, A. 2006. A visual vocabulary for flower classification. IEEE, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2: 1447–1454.

Nilsback, M.–E. and Zisserman, A. 2007. Delving into the whorl of flower segmentation. Proceedings of the British Machine Vision Conference (2007).
<http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/publications/papers/nilsback07.pdf>

Saitoh, T., Aoki, K. and Kaneko, T. 2004. Automatic recognition of blooming flowers. IEEE, International Conference on Pattern Recognition 1: 27–30.

Sánchez, E., S. Arias, R. J. Chávez y M. Hernández–Martínez. 2006. Apuntes técnicos para el conocimiento de la situación de conservación de especies de la familia *Cactaceae* en el estado de Querétaro. Jardín Botánico Regional de Cadereyta “Ing. Manuel González de Cosío”, Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro. Bases de datos SNIB–CONABIO proyecto No. CK016. México, D. F.

Scheinvar, L. 2004. Flora Cactológica del Estado de Querétaro, Diversidad y Riqueza. Fondo de Cultura Económica. México. 389 p.

Stankus, T. 2008. A Review and Bibliography of the Literature of Honey Bee Colony Collapse Disorder: A Poorly Understood Epidemic that Clearly Threatens the Successful Pollination of Billions of Dollars of Crops in America. Journal of Agricultural and Food Information 9: 115–143.

Zou, J. and Nagy, G. 2004. Evaluation of model–based interactive flower recognition. IEEE, International Conference on Pattern Recognition 2: 311–314.