

Análisis y modelado de sistemas de estabilización de sensores electro-ópticos embarcados en vehículos aéreos no tripulados

Cerrada Ramírez, Angel ¹, Blázquez García, Rodrigo ¹ y Burgos García, Mateo ^{1,*}.

¹ Observatorio Horizontes en Defensa y Seguridad ISDEFE-UPM. Av. Complutense, 30. 28040 Madrid. Correos electrónicos: angel.cerrada.ramirez@alumnos.upm.es (ACR), rodrigo.blazquez@upm.es (RBG), mateo@gmr.ssr.upm.es (MBG)

* Autor Principal y responsable del trabajo; Correo electrónico: angel.cerrada.ramirez@alumnos.upm.es (ACR)

Resumen: Entre las líneas de trabajo del Observatorio Horizonte en Defensa y Seguridad ISDEFE-UPM se encuentra el análisis de sensores embarcados en plataformas aéreas con aplicaciones emergentes en sistemas ISTAR (*Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance*). En esta comunicación, se realiza un análisis de los sistemas de estabilización de sensores electro-ópticos embarcados en plataformas aéreas no tripuladas y se modela el efecto de emborronado que se produce por su movimiento y vibración durante el tiempo de exposición para estimar las capacidades operativas de estos sistemas. En primer lugar, tras analizar los distintos tipos de UAVs utilizados en tareas de teledetección, se propone un modelo que permite simular el efecto de emborronado en imágenes debido al movimiento y vibración de la plataforma. El modelo propuesto simula de forma aleatoria, en base a las especificaciones de estabilidad de la plataforma analizada, las componentes angulares de vibración (en alabeo, cabeceo y guiñada), que determinarán la función PSF (*Point Spread Function*) de emborronado de la imagen. A partir de este modelo se analizan dos casos diferentes, las plataformas de ala fija y las plataformas de ala rotatoria, que presentan distintas características de estabilidad en vuelo. Finalmente, haciendo uso de imágenes emborronadas simuladas a partir del modelo propuesto, se evalúan las capacidades de detección mediante un algoritmo representativo de detección automática de blancos considerando tres situaciones: (1) imágenes sin emborronado (situación ideal), (2) imágenes emborronadas a partir del modelo propuesto, y (3) imágenes emborronadas sometidas a estabilización digital mediante algoritmos de deconvolución ciega que tratan de estimar y compensar la PSF que da lugar a dicho emborronado.

Palabras clave: Emborronado, estabilización de imagen, sensores electro-ópticos, UAV.

1. Introducción

Durante los últimos años, el uso de vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicle*, UAV) o drones se ha extendido a todo tipo de aplicaciones, tanto civiles como militares, debido a la reducción de sus costes de fabricación, operación y mantenimiento y a su mayor autonomía y facilidad de uso. Entre estas aplicaciones se encuentran la observación terrestre, el mapeado y la teledetección de objetos (*remote sensing*). Desde el punto de vista de las operaciones militares, los UAV no sólo presentan unos costes operativos inferiores a los sistemas de teledetección habituales (aeronaves tripuladas o satélites), sino que, además, son plataformas adecuadas para zonas de conflicto, gracias a su flexibilidad de maniobra y a su mayor seguridad. Todo ello ha derivado en un importante aumento del uso de este tipo de plataformas en funciones de teledetección utilizando sensores electro-ópticos.

En base a la tecnología de vuelo, se distinguen los UAV: (1) de ala fija, que presentan una mayor autonomía, un vuelo lineal más estable y la capacidad de alcanzar mayores velocidades y operar en condiciones con cierto viento; y (2) de ala rotatoria, habitualmente multirrotores, que presentan una mayor maniobrabilidad y la capacidad de mantenerse en una posición fija (*hovering*). Para llevar a cabo las funciones de teledetección, las cámaras de espectro visible e infrarrojo son las más utilizadas en el ámbito de la detección y reconocimiento de blancos.

Para evaluar las capacidades operativas de estos sistemas y tomar decisiones de posibles adquisiciones, se llevan a cabo campañas de vuelo y pruebas en entornos reales [1]. Sin embargo, el incremento en el número de posibles alternativas y su mayor complejidad hace necesario mejorar los métodos para estimar, previamente a dichas pruebas y de forma más exacta y precisa, las capacidades operativas de los sensores a partir de sus parámetros técnicos publicados por el fabricante. Por este motivo, con el objetivo de seleccionar adecuadamente aquellos sistemas que cumplan los requisitos y necesidades operativas, surge la necesidad de estudiar su comportamiento en función de las especificaciones técnicas de las plataformas aéreas y de los sensores electro-ópticos embarcados.

En lo relativo a cámaras de espectro visible e infrarrojo, el Criterio de Johnson [2] es el método más extendido para estimar su alcance máximo en base al número mínimo de píxeles que debe ocupar un objeto en la imagen para ser detectado. Sin embargo, este método sólo es aplicable de forma directa a situaciones estáticas al no tener en cuenta el efecto de emborronado (*blurring*), o pérdida de nitidez, que se produce, por ejemplo, por la vibración y el movimiento de las cámaras embarcadas en plataformas aéreas. Además, el Criterio de Johnson se desarrolló considerando que el análisis de las imágenes para llevar a cabo la discriminación de los objetos era realizado por un operador humano. Sin embargo, con el objetivo de cubrir grandes áreas en menor tiempo, las imágenes adquiridas mediante plataformas aéreas se procesan actualmente de forma automática utilizando algoritmos de detección cuyas capacidades de discriminación también deben ser evaluadas. Por este motivo, en esta comunicación, tras proponer un modelo que simula el efecto de emborronado en las imágenes adquiridas con sensores electro-ópticos embarcados, se evalúan las capacidades de detección utilizando algoritmos de detección automática sobre imágenes emborronadas y estabilizadas digitalmente mediante procesados de imagen basados en deconvolución ciega.

2. Modelado y simulación del efecto de emborronado en imágenes adquiridas mediante UAVs

Múltiples trabajos han estudiado los modelos cinemáticos y dinámicos de los UAVs multirrotores [3] y de ala fija [4] y de los sistemas de estabilización ópticos, basados en lentes móviles que modifican el camino óptico para compensar las vibraciones, y mecánicos, basados en el desplazamiento del propio sensor de imagen mediante microactuadores o en el uso de gimbales [5]. Sin embargo, además

de la propia complejidad que supone simular conjuntamente los diferentes subsistemas implicados en la adquisición de las imágenes, estos modelos requieren conocer en detalle dichos sistemas, incluyendo información y especificaciones que los fabricantes no suelen proporcionar. Por este motivo, el objetivo de este apartado es proponer un modelo que permita simular el efecto del movimiento y las vibraciones de la plataforma sobre las imágenes adquiridas a partir de las especificaciones típicas (campo de visión, número de píxeles, distancia focal, tamaño del sensor, velocidad del obturador, intervalo de vibración angular, etc.) proporcionadas por los fabricantes de cámaras embarcadas en UAVs y de los sistemas de estabilización. De esta forma, se podrá simular el efecto del emborronado y evaluar la degradación que produce sobre las capacidades operativas de los sensores electro-ópticos embarcados.

2.1. Modelado de la vibración y del emborronado asociado al movimiento de la plataforma

La imagen adquirida por una cámara embarcada en una plataforma móvil, se puede expresar matemáticamente como una convolución en dos dimensiones entre la imagen ideal sin emborronado y una función de dispersión de punto (*point spread function*, PSF) que representa la función o kernel del emborronado debido al movimiento (*motion blur*). Asumiendo que la imagen se encuentra enfocada y que la escena capturada es aproximadamente estática, el efecto de emborronado predominante en cámaras embarcadas en UAVs es el debido a la vibración y movimiento de la plataforma, es decir, al movimiento relativo entre la escena capturada y el sensor de imagen durante el tiempo que el sensor capta luz, conocido como tiempo de exposición (inverso de la velocidad de obturación).

El desplazamiento de la plataforma durante el tiempo de exposición puede aproximarse por una trayectoria lineal con velocidad constante, mientras que las vibraciones inducen un movimiento angular y se deben a factores que varían en función del tipo de plataforma. En el caso de ala fija, las vibraciones se deben principalmente al ruido del motor [6], que se produce a su propia frecuencia de rotación. En cuanto a las plataformas de ala rotatoria, la principal fuente de vibración son los rotores [7]. Las vibraciones que afectan a las plataformas aéreas son esencialmente sinusoidales, ya que se trata mayoritariamente de vibraciones periódicas que afectan a los ángulos de rotación y pueden descomponerse en una serie de vibraciones sinusoidales de diferentes frecuencias [8]. Sin embargo, el efecto que estas producen varía en función de si estas vibraciones son de alta o de baja frecuencia [9]. La vibración global que afecta al sistema de adquisición de imágenes proviene de diversas fuentes simultáneamente, cada una de las cuales induce diferentes frecuencias de vibración, de tal forma que algunas fuentes como el giro del motor o el de los rotores dan lugar a vibraciones que pueden considerarse de alta frecuencia, mientras que otras como los flujos de aire se pueden considerar generalmente de baja frecuencia. Aunque los sistemas de estabilización ópticos y mecánicos permiten compensar gran parte de las vibraciones que se producen sobre el sensor electro-óptico, existe una vibración residual que los fabricantes suelen especificar mediante un intervalo de vibración angular o mediante la varianza del error angular de apuntamiento debido a dicha vibración [10]. Esta vibración residual es la que se desea modelar ya que es la que afecta al emborronado de la imagen adquirida.

Teniendo esto en cuenta, la expresión que se propone para modelar la vibración global para cada una de las coordenadas angulares $b(t) = v(t) + n(t)$, consta de dos componentes, siendo $v(t)$ la propia vibración angular y $n(t)$ un ruido de proceso, considerado blanco Gaussiano de media nula y varianza σ_n^2 . Se asume que las vibraciones en cada eje de rotación son independientes entre sí. Para el término $v(t)$ de la vibración se propone el uso de una suma de múltiples sinusoidales cuyas frecuencias siguen una distribución modelada por una mezcla de Gaussianas (*Gaussian Mixture Model*, GMM) compuesta por dos distribuciones Gaussianas cuyas medias son las denominadas

frecuencias fundamentales de la vibración: la componente de baja frecuencia (f_{low}) y la componente de alta frecuencia (f_{high}). Este modelo se ajusta mejor a las propiedades espectrales de la vibración medida para estas plataformas que el uso de una única frecuencia que represente la vibración.

La generación de la vibración $v(t)$ considerando las dos distribuciones de frecuencia (componentes de baja y alta frecuencia) se lleva a cabo como una suma de señales sinusoidales cuyas frecuencias son determinadas por la respectiva variable aleatoria (VA) Gaussiana, de media μ igual a la frecuencia fundamental considerada, y varianza σ^2 , que dependerá del tipo de plataforma:

$$v(t) = \sum_{i=1}^N A_{low} \cos(2\pi f_{low_i} t + \varphi_{low_i}) + \sum_{i=1}^N A_{high} \cos(2\pi f_{high_i} t + \varphi_{high_i})$$

donde φ_{low_i} y φ_{high_i} son desfases aleatorios determinados por una VA uniforme de límites $(0, 2\pi)$ y A_{low} y A_{high} son las diferentes amplitudes que modelan el hecho de que las vibraciones de baja frecuencia presentan generalmente una mayor amplitud que las de alta frecuencia. Además, la vibración obtenida se normaliza y escala para que se ajuste a los rangos de vibración angular especificados por el fabricante. Añadiendo el ruido de proceso $n(t)$ se obtienen las tres componentes angulares (alabeo, cabeceo y guiñada) que permiten determinar la PSF.

La PSF debida al movimiento de la plataforma (composición del desplazamiento lineal y de la vibración generada) se obtiene analizando la evolución temporal durante el tiempo de exposición de la proyección de un punto del plano fotografiado (considerando la superficie terrestre con un modelo de Tierra plana y teniendo en cuenta la altura de vuelo y el apuntamiento o *tilt* de la cámara embarcada) sobre el plano de la imagen utilizando un modelo de cámara *pinhole* [11]. El análisis en tiempo discreto del recorrido del punto proyectado sobre el plano de la imagen da lugar a una representación cuya densidad de puntos en cada píxel permite obtener la PSF, como se muestra en la Figura 1.

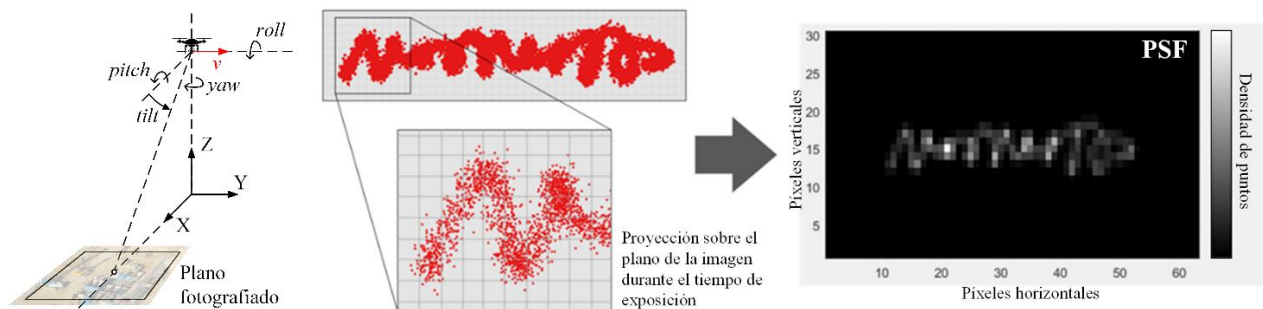


Figura 1. Geometría y modelo para generar la PSF debida al movimiento y vibración de la plataforma a partir del recorrido de la proyección de un punto del plano fotografiado proyectado sobre el plano de la imagen.

2.2. Resultados obtenidos a partir del modelo propuesto

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de una realización del modelo propuesto para dos casos representativos, plataformas de ala fija y plataformas de ala rotatoria, utilizando los parámetros mostrados en la Tabla 1, teniendo en cuenta la mayor estabilidad y velocidad lineal que suelen presentar las plataformas de ala fija respecto a las de ala rotatoria. En ambos casos, se considera una cámara embarcada de 10 MP de resolución, un campo de visión amplio (*Wide Field of View*, WFOV) con un FOV de 45° en vertical, una relación de aspecto 3:2, una altura de vuelo de 100 m y un *tilt* de 45° . Se ha considerado un tiempo de exposición de 100 ms, como caso peor para situaciones de baja iluminación o cámaras de infrarrojos no refrigeradas, que dará lugar a un emborronado severo

debido al movimiento de plataforma, siendo el efecto predominante que degrada la calidad de la imagen. Además, de acuerdo con estudios que han medido las componentes espectrales de las vibraciones de distintos UAVs, se han seleccionado como frecuencias fundamentales de vibración 2.5 Hz y 100 Hz, para la frecuencia baja y alta, respectivamente [12]. La desviación típica del error angular debido a la vibración se ha fijado en un valor típico de 0.03°.

Parámetro	Ala fija	Ala rotatoria
Relación de amplitudes entre las vibraciones de baja y alta frecuencia (A_{low}/A_{high})	4	2.5
Desviación típica de la vibración de baja frecuencia (σ_{low})	0.25 Hz	0.25 Hz
Desviación típica de la vibración de alta frecuencia (σ_{high})	5 Hz	10 Hz
Relación señal a ruido del ruido de proceso	20 dB	15 dB
Velocidad lineal del dron	20 m/s	10 m/s

Tabla 1. Parámetros de la simulación para los casos de ala fija y ala rotatoria.

En la Figura 2, para los casos analizados, se representan las componentes de vibración resultantes de una simulación utilizando el modelo propuesto, las PSFs para el tiempo de exposición considerado y un ejemplo de imágenes emborronadas mediante dichas PSFs. Puede observarse que, en el caso de ala fija, debido a su mayor estabilidad, las vibraciones predominantes son las de baja frecuencia que pueden aproximarse a un movimiento lineal durante el tiempo de exposición, por lo que la PSF obtenida del movimiento global se aproxima más a una línea recta. Sin embargo, su mayor velocidad da lugar a un mayor desplazamiento lineal durante el tiempo de exposición. En cambio, en las plataformas de ala rotatoria el efecto de las vibraciones de alta frecuencia es más predominante, aunque la longitud lineal del kernel de emborronado es menor debido a la menor velocidad de la plataforma.

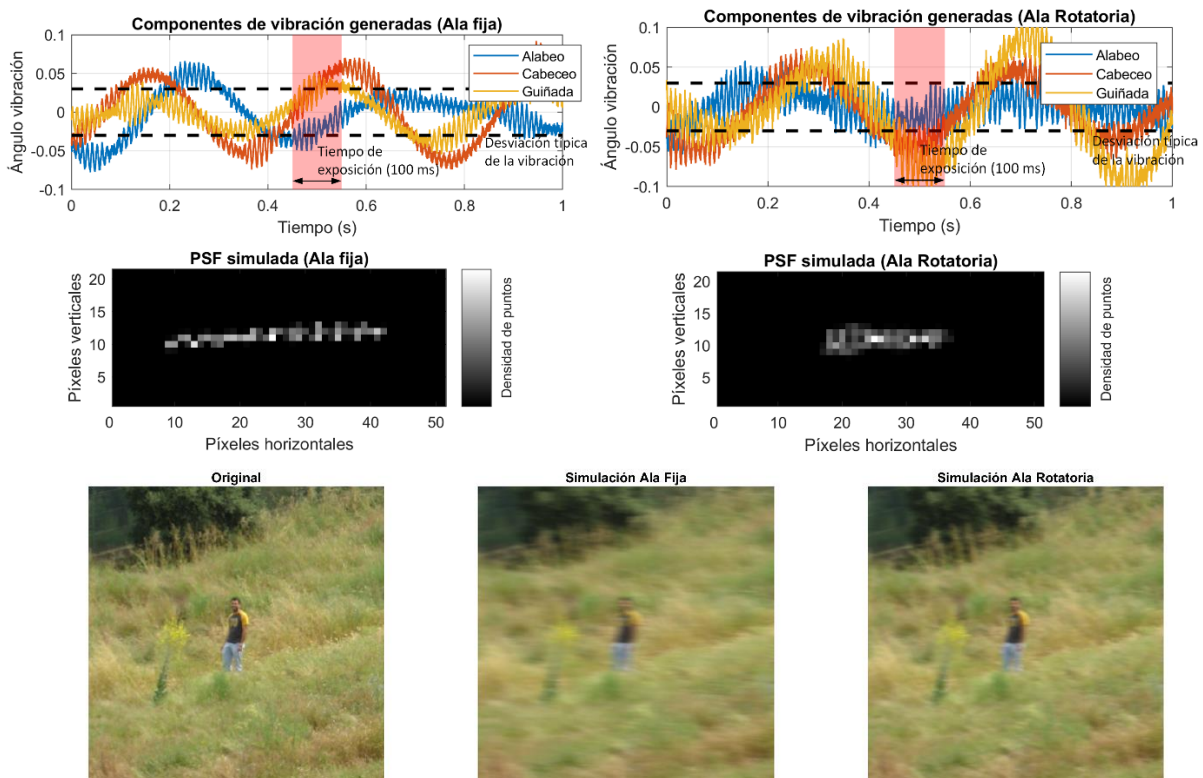


Figura 2. Componentes de la vibración para una realización del modelo, PSFs obtenidas debidas al movimiento e imágenes emborronadas por dichas PSFs considerando UAVs de ala fija y de ala rotatoria.

Estas características afectan de forma distinta a los resultados obtenidos de la estabilización digital mediante algoritmos de deconvolución ciega que tratan de estimar y compensar la PSF debida al movimiento, y que suelen funcionar mejor con PSFs predominantemente lineales, por lo que su desempeño e impacto sobre las capacidades de detección deben ser también evaluados cuando se emplean en imágenes adquiridas utilizando cámaras embarcadas en plataformas aéreas.

3. Análisis de las capacidades de detección utilizando algoritmos de desemborronado y detección automática

Utilizando el modelo de vibración y de obtención de la PSF presentado, se pretende evaluar el comportamiento de un algoritmo representativo de desemborronado combinado con un algoritmo de detección automática de objetos, de acuerdo con el procesado típico mostrado en la Figura 3. Por un lado, los algoritmos de desemborronado (*deblurring*) pretenden obtener la imagen latente con la mayor nitidez posible, partiendo de una única imagen adquirida con el sensor electro-óptico afectado por vibraciones y movimiento. Concretamente se ha utilizado como algoritmo el propuesto por Krishnan et al. [13]. Por otro lado, de cara a proponer una extensión del Criterio de Johnson para la estimación del alcance de las cámaras embarcadas, es necesario establecer un método que permita analizar la degradación de la imagen debida al emborronado y la capacidad de compensación por parte de los algoritmos de desemborronado utilizados. Para ello, se implementa un algoritmo de detección automática de objetos que permite comparar la eficiencia de la detección de blancos en imágenes sin emborronado, emborronadas y estabilizadas digitalmente (desemborronadas). En este caso, se hace uso de un algoritmo de detección de “objetos salientes” (*saliency detection*), mediante el algoritmo *Minimum Barrier Salient Object Detection* [14], que permite detectar objetos por contraste con el fondo de la imagen. Utilizando un conjunto de imágenes aéreas con blancos y realizando submuestreos para simular distintos tamaños, la Figura 4a muestra los resultados obtenidos de una simulación de Monte Carlo de la probabilidad de detección del blanco en función del número de píxeles que ocupa en la imagen original sin emborronar para los casos de ala rotatoria y ala fija definidos anteriormente. La mayor velocidad lineal de la plataforma de ala fija induce una mayor degradación, aunque en ambos casos se consigue una mejora importante de la capacidad de detección al utilizar el algoritmo de desemborronado. Cabe destacar que, a igual velocidad de vuelo, la mejor estabilidad de las plataformas de ala fija da lugar a mejores resultados que las plataformas de ala rotatoria.



Figura 3. Esquema de la cadena de proceso típica que incluye el desemborronado de la imagen (*deblurring*) y la detección automática de objetos.

El movimiento y la vibración de la plataforma durante el tiempo de exposición dan lugar a una pérdida de resolución que equivale aproximadamente al tamaño de la PSF. Como se muestra en la Figura 4b, dicha PSF puede aproximarse en media por una forma rectangular con un número de píxeles $N_{PSF} = N_V \cdot N_H$, que viene dado por: las especificaciones de la cámara (IFOV, *instantaneous FOV*, en vertical (V) y horizontal (H) y el tiempo de exposición, t_{exp}), la amplitud típica de la vibración de alta frecuencia, A_{high} (predominante en el efecto de emborronado), la velocidad de la plataforma, v_{uav} , y la distancia a la que se encuentra la escena capturada, R .

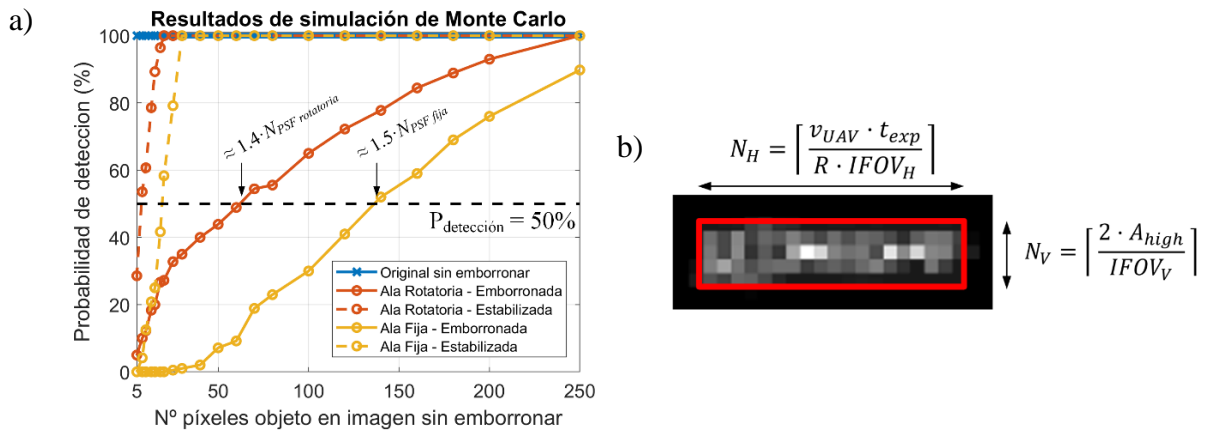


Figura 4. a) Resultados de una simulación de Monte Carlo sobre un conjunto de imágenes con blancos utilizando el modelo de emborronado propuesto y aplicando un algoritmo de detección automática sobre imágenes emborronadas e imágenes posteriormente estabilizadas digitalmente mediante un algoritmo de deconvolución ciega. b) Tamaño aproximado de la PSF que da lugar a una pérdida de resolución equivalente.

Por tanto, de forma aproximada, para cámaras embarcadas en plataformas aéreas, el objeto deberá ocupar al menos $N_{PSF} \cdot N_{min_CJ}$ píxeles, siendo N_{min_CJ} el número mínimo de píxeles que fija el Criterio de Johnson para el nivel de discriminación analizado (detección, clasificación o identificación), válido para situaciones estáticas. Esta aproximación se ajusta a los resultados obtenidos de la simulación, en los que para las imágenes emborronadas el blanco debía ocupar un número de píxeles superior al tamaño de la PSF por un factor que es próximo al fijado por el Criterio de Johnson para ser detectado con una probabilidad superior del 50%.

Esta aproximación, que permite extender el Criterio de Johnson para estimar de forma sencilla las capacidades de detección cuando la cámara se embarca en una plataforma móvil, y que supone una limitación importante del alcance o del tamaño mínimo detectable respecto a situaciones estática, pone de relieve la importancia de los sistemas de estabilización y de la propia estabilidad de la plataforma en aplicaciones de teledetección. De hecho, como se observa en los resultados de las simulaciones realizadas, el empleo de una etapa de estabilización digital en el procesamiento mediante algoritmos de deconvolución ciega mejora de forma importante las capacidades de detección. Sin embargo, estos algoritmos requieren generalmente una elevada carga computacional y no se ejecutan en tiempo real.

4. Conclusiones

El uso de plataformas aéreas no tripuladas para aplicaciones de teledetección abre nuevos horizontes difíciles de alcanzar mediante otros sistemas clásicos. Entre estas plataformas se encuentran UAVs de pequeño tamaño (peso máximo al despegue inferior a 150 kg de acuerdo con la clasificación de la OTAN) que durante el cumplimiento de sus misiones se mueven a gran velocidad y se ven afectados por turbulencias u otros efectos atmosféricos, y cuyas cargas de pago están muy limitadas en cuanto al peso máximo. Para extender sus límites y mejorar las capacidades operativas alcanzables utilizando este tipo de vehículos es necesario maximizar el desempeño de todos los sistemas involucrados. Entre estos sistemas se encuentra el sistema de adquisición imagen, cuyas capacidades de detección de blancos dependen en gran medida de los sistemas de estabilización utilizados.

En este trabajo se ha analizado el efecto del movimiento del dron y de las vibraciones principalmente inherentes a la estructura del dron (motor, fuselaje, cavidades, etc.) sobre la adquisición de imágenes mediante sensores electro-ópticos embarcados. En base a medidas publicadas sobre el

espectro de vibración de estas plataformas, se ha propuesto un modelo que permite simular las vibraciones que determinan el emborronado de la imagen. A partir del modelo propuesto se han analizado dos casos de estudio, haciendo una distinción entre plataformas de ala fija y de ala rotatoria. Además, para evaluar la mejora que conlleva la estabilización digital, se ha combinado el uso de algoritmos desemborronado basados en la deconvolución ciega con algoritmos de detección automática sobre imágenes simuladas utilizando el modelo propuesto.

El análisis realizado en este trabajo muestra que la estabilización de la imagen, incluyendo técnicas de postprocesado, ofrece mejoras significativas en las prestaciones de los sistemas de teledetección. Por otro lado, para ayudar a la toma de decisiones y a la preselección y adquisición de sistemas, en un sector con cada vez más alternativas comerciales, es esencial conocer el efecto de la estabilidad de la plataforma sobre las capacidades de detección de blancos en las imágenes adquiridas. Por este motivo, se ha propuesto una extensión del Criterio de Johnson que tiene en cuenta la degradación producida por las vibraciones y movimiento de la plataforma durante el tiempo de exposición.

Se pretenden realizar medidas experimentales para verificar los resultados obtenidos y validar el modelo y la metodología de simulación y estimación de la capacidad de detección a partir de la extensión del Criterio de Johnson utilizando las especificaciones proporcionadas por los fabricantes.

Referencias

- [1] Ministerio de Defensa de España, “*Monografías del SOPT 15: Proyecto RAPAZ y tecnologías anti-RPAS*,” 2017.
- [2] T. A. Sjaardema, C. S. Smith y G. C. Birch, “History and Evolution of the Johnson Criteria”, *Sandia National Laboratories*, 2015.
- [3] C. Powers, D. Mellinger y V. Kumar, “Quadrotor Kinematics and Dynamics,” en *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, New York: Springer, 2015, cap. 16, pp. 307-328.
- [4] V. Dobrokhodov, “Kinematics and Dynamics of Fixed-Wing UAVs,” en *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, New York: Springer, 2015, cap. 14, pp. 243-277.
- [5] P. Skoglar, “Modelling and Control of IR/EO-gimbal for UAV Surveillance Applications”, *Linköpings Universitet*, 2002.
- [6] H. Ma y J. Wu, “Analysis of positioning errors caused by platform vibration of airborne LiDAR system,” *IEEE Int. Symp. Instrumentation and Control Technology*, London, 2012, pp. 257-261.
- [7] J. Verbeke y S. Debruyne, “Vibration analysis of a UAV multirotor frame,” *Int. Conf. Noise and Vibration Engineering*, Leuven, Belgium, 2016, pp. 2329-2337.
- [8] C. Li y F. Tan, “Effect of UAV vibration on imaging quality of binary optical elements,” *Int. Conf. Mechatronics and Automation*, Changchun, China, 2018, pp. 1693-1698.
- [9] J. Haghshenas, “Effects of satellite platform’s vibrations on the image quality of a remote sensing payload: system level design and challenges,” *Optical Systems Design 2015: Optical Design and Engineering*, vol. 9626, no. 74, p. 96262P, 2015.
- [10] J.M. Hilker, M.L. Bowen y J. Wang, “Specifications for image stabilization systems”, *Tactical Infrared Systems*, vol. 1498, pp. 24-38, 1991.
- [11] E.R. Davies, “Image Transformations and Camera Calibration”, en *Computer and Machine Vision: Theoriz, Algorithms, Practicalities*, Waltham: Academic Press, 2012, pp. 478-504.
- [12] Z. Caratao, K. Gabel, A. Arun, B. Myers, D. Swartzendruber y C.W. Lum, “MicaSense aerial pointing and stabilization system: Dampening in-flight vibrations for improved agricultural imaging,” *AIAA Inf. Syst. Infotech Aerospace*, Kissimmee, EE.UU., 2018, pp. 1-16.
- [13] D. Krishnan, T. Tay y R. Fergus, “Blind deconvolution using a normalized sparsity measure” *IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, Providence, EE.UU., 2011, pp. 233-240.
- [14] J. Zhang, S. Sclaroff, Z. Lin, X. Shen, B. Price y R. Mech, “Minimum barrier salient object detection at 80 FPS,” *IEEE Int. Conf. Computer Vision*, Santiago, Chile, 2015, pp. 1404-1412.