



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”  
Multidisciplinario  
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México  
ISBN: 978-607-95635

## ESTUDIO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMA PARA AVIONES NO TRIPULADOS

Faisal M. Zeidan A. PhD, Fernando Chicaiza C., Cristian Chuchico A.  
Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE Latacunga, Ecuador  
[ffzeidan@espe.edu.ec](mailto:ffzeidan@espe.edu.ec) [fachicaiza@espe.edu.ec](mailto:fachicaiza@espe.edu.ec) [cpchuchico@espe.edu.ec](mailto:cpchuchico@espe.edu.ec)

### RESUMEN.

A medida que aumenta el rango de las misiones de los UAV, la comunicación desde tierra requiere de infraestructuras más complejas. Igualmente se incrementa la vulnerabilidad a las interferencias disminuyendo la confiabilidad del enlace de comunicación. En respuesta a este problema se han desarrollado sistemas para que el UAV pueda operar de manera autónoma, independientemente de la comunicación con tierra. Cuatro arquitecturas diferentes se estudian y comparan: la navegación autónoma basada en comparación de imágenes, la navegación autónoma basada en sensores de flujo óptico, la navegación autónoma basada en control por visión y la navegación autónoma basada en GPS – IMU.

### ABSTRACT

As the range of UAV operations increases, communication with the vehicle becomes more complex in infrastructure requirements. Additionally, there is an increase in susceptibility to interferences which reduces the reliability of the remote controlled communication link. In response to this problems several navigation systems architectures have been developed in order to enhance the UAV autonomous navigation capabilities. Four of these autonomous navigation architectures are studied and compared, based in its principal technical base: image comparison, the optical flow sensors, the vision control, and the GPS-IMU.

### Palabras Clave



## “CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

UAV, GPS-IMU, navegación autónoma, comparación imágenes, flujo óptico, visión

### 1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de Vehículos Aéreos No Tripulados es creciente. Los UAV (Unmanned Aerial Vehicle, por sus siglas en Inglés) son empleados, no solo en actividades militares sino también en labores civiles como estudios topográficos, control del tráfico aéreo, labores de monitoreo y vigilancia, acceso a lugares peligrosos o contaminados, entre otros. Los UAV pueden operar a control remoto o de manera autónoma, con instrucciones pre-programadas. Para misiones de largo rango la comunicación desde tierra con el UAV requiere de una infraestructura costosa y compleja. Adicionalmente, al aumentar la separación física entre el operador en tierra y el vehículo aéreo, disminuye la confiabilidad del sistema de teleguiado y el enlace de comunicación aumenta su vulnerabilidad a las interferencias. Por ésta y otras razones adicionales se han desarrollado sistemas para que el UAV pueda operar de manera autónoma, independientemente del control terrestre. Entre otras ventajas la navegación autónoma permite incrementar el rango de vuelo, mantener la integridad del vehículo debido a su capacidad de reacción automática y autónoma, disponer de planes de contingencia automatizados que permitan al vehículo implementar soluciones en caso de fallas, y disponer de mayor versatilidad en la planificación de nuevas misiones.

### 2. ARQUITECTURAS DE LOS SISTEMAS DE NAVEGACIÓN AUTONOMA

La arquitectura de los sistemas representa, de manera esquemática, los elementos físicos y lógicos implementados en las soluciones de navegación autónoma. En la arquitectura se presentan las señales de entradas y salidas implementadas y se resume el funcionamiento del sistema. En los sistemas de navegación autónoma, se han implementado diferentes arquitecturas de solución



## “CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

en función de la tecnología de control usado, de los elementos, de los equipos y de las técnicas de control de vuelo, entre otras. En el párrafo que sigue presentamos las arquitecturas más representativas de los diversos métodos de control utilizados, de las distintas técnicas de navegación y del uso de diferentes tecnologías.

### **2.1 Arquitectura 1: Navegación autónoma basada en comparación de imágenes**

Una de las fuentes de falla y error en los sistemas de navegación de los UAV proviene de las inestabilidades de funcionamiento del sistema GPS. El guiado y control de un UAV estándar se basa en la combinación del uso del sistema GPS y de sensores inerciales (INS). Cuando la señal GPS es intervenida o falla, la estimación provista por el sistema INS resultará errónea. Para prever este tipo de falla potencial, se han implementado sistemas de navegación autónoma sustitutos. Una de las soluciones encontradas se basa en la navegación con apoyo en sistemas de visión. En (6) se realiza el estudio de un sistema de navegación autónoma utilizando una cámara e imágenes geo-referenciadas proporcionadas por satélite. De esta manera, el UAV es piloteado autónomamente gracias a un algoritmo de sistemas de registro de video a bordo e imágenes proporcionadas vía satélite, disponibles a bordo e incluidas en el sistema.

#### **Arquitectura y componentes**

La arquitectura de navegación fusiona información obtenida de un sistema de sensores inerciales (INS), compuesto de tres acelerómetros y tres giroscopios, una cámara de video monocular y un sensor de presión barométrica. La información de los sensores es fusionada utilizando un filtro de Kalman para





## “CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

(intersecciones de caminos, edificios, etc.), resulta fácil contrastar las imágenes. De manera diferente, en terrenos de zonas rurales esta tarea plantea algunas dificultades. En éste caso de ambientes no estructurados se utiliza un odómetro visual el cual proporciona una exactitud razonable. La fusión de arquitecturas permite reemplazar la señal (no disponible) del GPS, con la información proveniente del sistema de visión. La posición calculada usando el odómetro se fusiona con el registro de imagen; finalmente la posición obtenida como resultado se utiliza para actualizar el filtro de Kalman. La ruta de vuelo trazada por el GPS permite validar los resultados de una posible navegación sin GPS.

Las ventajas destacables de este tipo de navegación autónoma se resumen en la capacidad de ubicar la posición del vehículo sin necesidad de información externa en tiempo real (GPS) así como la posibilidad de navegar autónomamente con retorno al punto de despegue o un punto de aterrizaje forzoso que se haya configurado previamente. Entre las desventajas podemos mencionar la necesidad de un computador con grandes capacidades de procesamiento de imágenes. Se requiere adicionalmente considerable capacidad de memoria externa que permita almacenar imágenes geo-referenciadas.

### **2.2 Arquitectura 2: Navegación autónoma basada en sensores de flujo óptico**

La navegación de vehículos aéreos no tripulados opera, tradicionalmente, con dispositivos GPS. Este tipo de navegación presenta limitaciones operacionales en ambientes cerrados como túneles, cuevas, casas o lugares donde no se disponga de una señal GPS apropiada, todo lo cual impulsó la investigación en el área de los sensores ultrasónicos, los sensores infrarrojos, los escáner láser y las cámaras Kinect, entre otros tipos de dispositivos, que proporcionan capacidad de navegar, autónomamente, en ambientes cerrados.

### **Arquitectura y componentes**



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”  
Multidisciplinario  
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México  
ISBN: 978-607-95635

El modo de navegación y posicionamiento del vehículo se basa en la utilización de una cámara ADNS 3080, la cual provee 6400 fps. El esquema de la arquitectura de este sistema con 6 controladores PID en cascada (ver figura 2), basa su lógica en controlar cada grado de libertad con cada uno de los controladores PID. La estimación del flujo óptico es la entrada (medición) de los dos controladores de posición (hacia adelante y hacia los lados). La segunda entrada para el controlador de posición, es la configuración de los puntos x o y, que pueden ser cargados remotamente. Esto permite modificar la altura de vuelo y el desplazamiento autónomo en 3D. La diferencia entre la configuración de puntos y la estimación óptica (entradas de los dos controladores PID) indican errores, (en los ejes de coordenadas X, Y). Las salidas de los controladores de posición aportan la configuración de puntos de eje de balanceo y eje de cabeceo. En (5) se ilustra el uso de sensores de flujo óptico. Respecto de su funcionamiento, este sistema tiene la capacidad de seguir un trazo cerrado para lo cual se dibuja una ruta cerrada, se marca un punto de inicio y se definen posteriormente las posibles trayectorias que puede seguir el UAV.

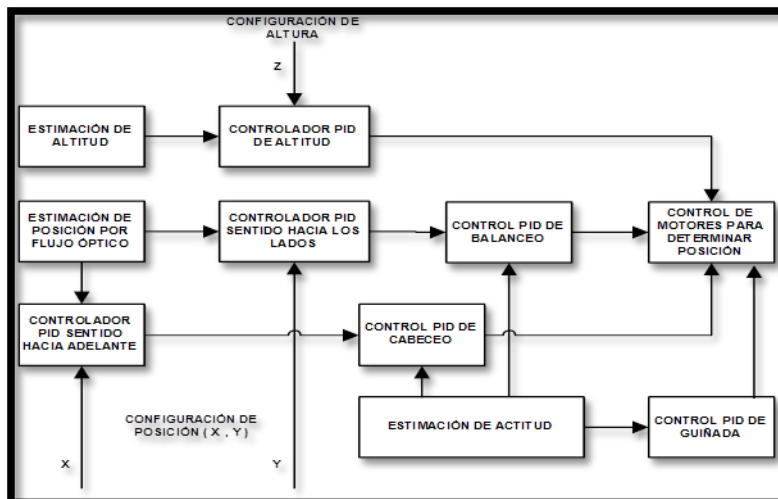


Figura 2. Arquitectura de navegación autónoma basada en sensor de flujo óptico



## “CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Entre las ventajas y desventajas podemos citar lo siguiente: este tipo de control provee un sistema de posicionamiento alternativo en caso de desconexión del sistema de posicionamiento principal. El disponer de una ruta de regreso del vehículo es importante para mantener la integridad del UAV y la seguridad general de la misión. Como desventaja, debe disponerse de una ruta marcada y predefinida además de un filtrado de imágenes previo, debido a la capacidad de la cámara.

### **2.3 Arquitectura 3: Navegación autónoma basada en control por visión**

En (1) se desarrolla un algoritmo de procesamiento de imágenes que consiste en precisar un punto de entrada y un punto de salida dentro del borde de la imagen, a partir de los cuales se puede estimar la posición y la dirección de la aeronave. El funcionamiento de esta arquitectura se inicia con la detección de bordes entre segmentos de diferentes colores, sin considerar la clasificación por colores debido a que este algoritmo es propenso a fallas debido a su vulnerabilidad en condiciones dinámicas de iluminación.

#### **Arquitectura y componentes**

El algoritmo de control de vuelo comprende tres porciones: el lazo interno de control, el control de lazo externo y la planificación de ruta. Los sensores de IMU proporcionan la retroalimentación dada al controlador de bucle interno para controlar la estabilidad de los UAV. Las mediciones de visión de retroalimentación dadas al controlador de bucle externo, controlarán el ángulo de dirección y la posición del UAV. Al lado del controlador de bucle externo, el algoritmo de planificación de ruta generará un punto de ajuste de posición para conducir el vehículo. El sistema de control total de los UAV se resume en el diagrama de bloques mostrado en la figura 3. Entre las ventajas de este sistema de control a través de procesamiento de imágenes podemos mencionar que permite el vuelo

“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”  
Multidisciplinario  
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México  
ISBN: 978-607-95635

en ambientes cerrados al no requerir de GPS para su funcionamiento. Su principal desventaja es la de necesitar gran capacidad de procesamiento de información a alta velocidad que le permita ejecutar un algoritmo de control eficiente.

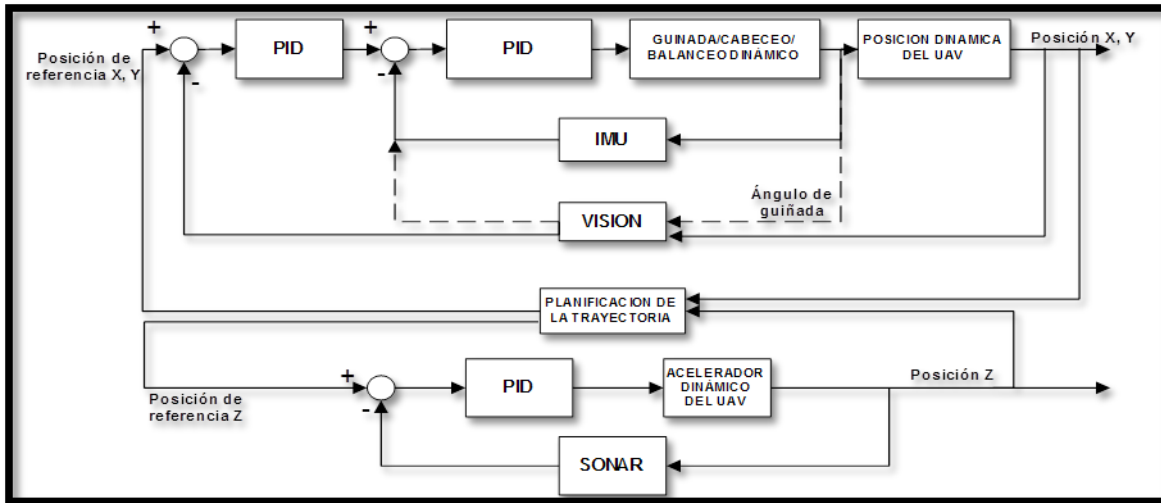


Figura 3. Diagrama de bloques de control total

Una desventaja adicional lo constituye la complejidad del procesamiento digital de imágenes en tiempo real, necesario para el reconocimiento de la trayectoria a seguir.

#### 2.4 Arquitectura 4: Navegación autónoma basada en GPS – IMU

Los GPS poseen un tiempo de respuesta preciso, que les permite jugar un rol preponderante en aplicaciones de posicionamiento, siendo el instrumento más utilizado para labores de navegación autónoma. Sin embargo, para obtener el posicionamiento completo de un vehículo aéreo se requiere, adicionalmente, de un algoritmo inercial que proporcione las variables adicionales de vuelo: las referentes a la inclinación de los ejes del avión con respecto al eje de referencia "tierra", o AHRS (Attitude and Heading Reference System) y, por otra parte, el sistema de posicionamiento y velocidad del avión. En (7) se describe un sistema



## “CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

de navegación GPS-IMU que puede ser aplicado a diferentes tipos de vehículos no tripulados. Su diseño incluye un filtro extendido de Kalman, indispensable para el correcto funcionamiento del IMU.

### **Arquitectura y componentes**

El algoritmo INS (Inertial Navigation System) se basa en una herramienta matemática denominada filtro Kalman el cual realiza un seguimiento de las señales de aceleración, velocidad y posición y de sus errores respectivos. Todos estos datos se envían a los módulos que establecen los bucles de control para pilotar el avión. El AHRS se envía al módulo de dinámica del vuelo que se encarga de mantener el avión nivelado, mantener las velocidades, etc., mientras que la posición (INS/GPS) se envía al módulo de trayectorias que determinarán la posición del avión respecto de su objetivo de llegada, en función de lo cual decide si tiene que girar y en que ángulo hacerlo. La IMU (Inertial Measurement Unit) es imprescindible para un funcionamiento confiable del piloto automático. El IMU está equipado con dos tipos de sensores: a). Los acelerómetros, (3 acelerómetros en los ejes XYZ), los cuales entregan las tres componentes del vector gravedad. Sabiendo que el vector gravedad es perpendicular a la superficie terrestre, se puede calcular la orientación del vehículo con respecto a la tierra. Sin embargo, las aceleraciones debidas a los giros, en vuelo, alteran la medida del vector gravedad. Debido a esto, la medida resultará correcta únicamente si se lleva a cabo en periodos de tiempo suficientemente largos, y b). Los giroscopios, (dos o tres giroscopios) destinados a medir la aceleración angular con la que podremos calcular la velocidad angular (integrando). Con la velocidad angular calculamos el ángulo (integrando otra vez), y obtenemos la orientación del vehículo con respecto a tierra. Estos sensores son sensibles al ruido y la deriva que restan precisión a sus medidas. Solo funcionan confiablemente en periodos de tiempo muy cortos.

“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”  
Multidisciplinario  
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México  
ISBN: 978-607-95635

El funcionamiento de esta arquitectura se define a continuación. El sistema debe describirse a partir de un modelo lineal. En caso de no ser lineal, deberá linearizarse (filtro extendido de Kalman). Los ruidos del sistema y de las mediciones se clasifican en blancos y gaussianos. Un ruido es blanco cuando su valor no tiene correlación en el tiempo y para el que su potencia es igual en todas las frecuencias. Los ruidos blancos no existen, pero aproximan aceptablemente la realidad. El funcionamiento del filtro de Kalman se describe en tres etapas: inicialización, predicción y corrección. La ganancia del filtro se calcula con información estadística referente a la precisión de los sensores y de los modelos utilizados. La estimación que hace el filtro se utiliza nuevamente en la etapa de predicción para establecer el valor del siguiente estado. La estructura general se ilustra en la Fig. 6.

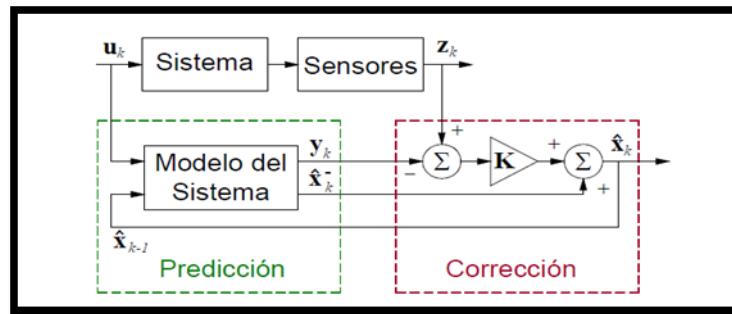


Figura 6. Etapas del filtro de Kalman: predicción y corrección

Entre las ventajas y desventajas podemos citar lo siguiente: la información y modo de utilización de sistemas GPS/IMU es sencillo y sus módulos son económicamente accesibles. Al ser extendida su aplicación, los sistemas GPS/IMU, son vulnerables a interferencias por lo que deben preverse sistemas de protección.

### 3. CONCLUSIONES



## “CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

A pesar de las limitaciones mencionadas, los UAV no pueden aún prescindir del conjunto IMU/GPS para determinar su posición y realizar la navegación. En la actualidad algunos de los sistemas alternativos capaces de remplazarlos continúan manteniendo un carácter provisional. Los dos sistemas con mayor potencial de reemplazo –el basado en visión artificial y el basado en sensor de flujo óptico- poseen limitaciones relacionadas con las características de solidez, de luminosidad así como con la extensión de la superficie sobrevolada. Por otra parte estos sistemas alternativos requieren en la actualidad de computadoras con altas prestaciones para filtrado, procesamiento de imágenes y manejo de algoritmos de control entre otros.

### 4. BIBLIOGRAFÍA

1. Swee King Phang, et. al. “Autonomous Mini-UAV for Indoor Flight with Embedded On-board Vision Processing as Navigation System”, 2010.
2. Lucio R. Ribeiro and Neusa Maria F. Oliveira, “UAV Autopilot Controllers Test Platform Using Matlab/Simulink and X-Plane”, 2010.
3. Mohammad A. Al-Jarrah, et. al., “Autonomous aerial vehicles, guidance, control and signal processing platform”, perteneciente a y otros. 2011.
4. A. Sheibani<sup>1</sup>, M. A. Pourmina, “Designing an Autopilot System for Control of Unmanned Aerial Vehicles”, 2013.
5. Nils Gageik<sup>1</sup>, Michael Strohmeier and Sergio Montenegro, “An Autonomous UAV with an Optical Flow Sensor for Positioning and Navigation”, University of Würzburg, Würzburg, Germany, 2009.
6. Gianpaolo Conte and Patrick Doherty “An Integrated UAV Navigation System Based on Aerial Image Matching”, Universidad de Linköping, SWEDEN, 2012
7. Lorena Cardona, Marisol O. Cardenas, Luis B. Gutiérrez, “Sistema De Navegación Para Vehículos No Tripulados”, 2011



**“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”**  
Multidisciplinario  
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México  
ISBN: 978-607-95635

## RECONOCIMIENTO

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del Proyecto Prometeo de la Secretaría Nacional de Educación, Ciencia y Tecnología de la República del Ecuador.