

# Trabajo de Fin de Master Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática

## Posicionamiento de un UAV usando marcadores visuales

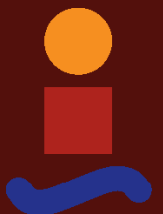
Autor: Isidro Jesús Arias Sánchez

Tutores: Manuel Vargas Villanueva

Manuel Gil Ortega Linares

**Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2020





Trabajo de Fin de Master  
Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática

# **Posicionamiento de un UAV usando marcadores visuales**

Autor:

Isidro Jesús Arias Sánchez

Tutores:

Manuel Vargas Villanueva

Profesor Titular

Manuel Gil Ortega Linares

Catedrático

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo de Fin de Master:      Posicionamiento de un UAV usando marcadores visuales

Autor:            Isidro Jesús Arias Sánchez

Tutores:        Manuel Vargas Villanueva, Manuel Gil Ortega Linares

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Agradecimientos

---

Estos 4 años han sido mejores gracias al apoyo de algunas personas. Especialmente quiero agradecerélos a mis padres, Mercedes y José, a mi tía Antonia, a mi abuela Mercedes, a mi hermano Héctor, a Candi, mi novia, a mis amigos de Sevilla, Ángel, Carlos, David, Fernando, Jorge y Samuel, a los de Cádiz, Daniel, Juan Luís, Javier Mena, Javier Sanz, Pepe y Pedro, y por último y no menos importante, a mi tutores Manuel Vargas y Manuel Gil, y al resto de los profesores que me han sabido enseñar y de los que tanto he aprendido. Gracias a todos.

*Isidro Arias Sánchez  
Sevilla, 2019*





# Resumen

---

En este proyecto se va a desarrollar el estudio de un vehículo aéreo no tripulado que tiene dos hélices o rotores orientables, denominado tiltrotor, del ingles *tilt* que significa inclinar.

El fundamento de este trabajo es contribuir en el estudio de una nave convertible en la que los rotores, al ser inclinables, funcionan con las ventajas de dos modelos de aeronaves diferentes, una del tipo helicóptero que lo dota de alta maniobrabilidad, y otra de tipo aeroplano que le permite recorrer largas distancias.

Entendiendo la importancia de la simulación en la construcción de vehículos aéreos, se opta por la elección de dos herramientas diferentes en el ámbito de la simulación. Se trata de comprobar y testar las coincidencias entre ellas, de manera que se corrija y disminuya la posibilidad de errores en el proceso.

Por último, se añade al proyecto la fabricación de un tiltrotor para verificar los modelos utilizados en la simulación.



# Abstract

---

The basis of this work is to contribute to the study of a convertible aerial vehicle in which the rotors, being tiltable, operate with the advantages of two different aircraft models, one of the helicopter type that gives it high maneuverability, and one of the airplane type that allows traveling long distances.

Understanding the importance of simulation in the design of aerial vehicles, we have chosen two different tools in the field of simulation. It is about verifying and testing the coincidences between them, so that it corrects and reduces the possibility of errors in the process.

Finally, a prototype will be built in order to verify the models used in the simulation.



# Índice Abreviado

---

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<b>1 Estimador PX4</b>	<b>1</b>
1.1 Ejemplo	1
1.2 EKF para modelo bidimensional	2
<i>Índice de Figuras</i>	5
<i>Índice de Tablas</i>	7



# Índice

---

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<b>1 Estimador PX4</b>	<b>1</b>
1.1 Ejemplo	1
1.1.1 Detalles de implementación	2
1.2 EKF para modelo bidimensional	2
<i>Índice de Figuras</i>	5
<i>Índice de Tablas</i>	7





# 1 Estimador PX4

---

En muchas ocasiones se tienen sensores con un retraso y una frecuencia de actualización muy diferentes entre ellos, por ejemplo una IMU es mucho más rápida que el procesamiento de la imagen de una cámara. PX4 lo soluciona añadiendo más elementos a la estructura original de un estimador de estados. Uno de los elementos es un *Filtro de Kalman Extendido* (EKF). Este no usa las medidas más nuevas que le llegan, si no que las almacena y utiliza las que llegaron hace un determinado tiempo. Corriendo en paralelo pero a una frecuencia mayor, existe un estimador llamado *Filtro de Salida*, el cual sí que utiliza la última medida del acelerómetro y del giróscopo.

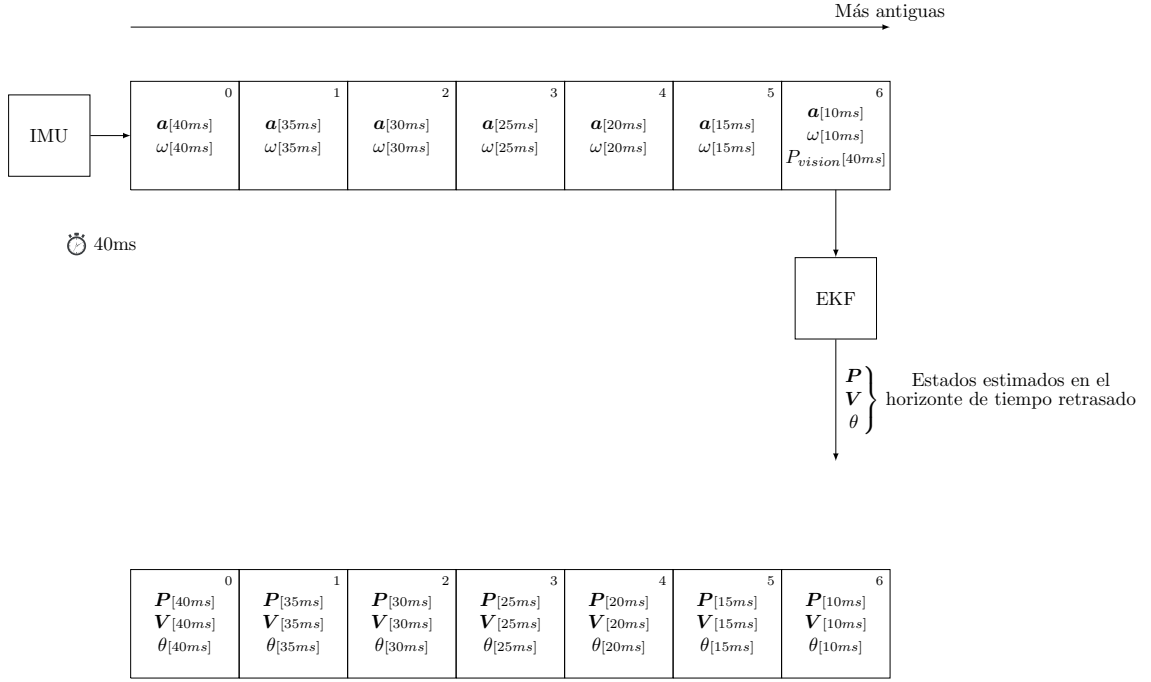
## 1.1 Ejemplo

Supongamos que se tiene un sistema que se mueve en el espacio del que se quiere conocer sus estados, en concreto, su posición, su velocidad y su ángulo. Para este objetivo se disponen de sensores que son: acelerómetro, giróscopo, GNSS y posición por visión. Cada uno de ellos tiene diferentes propiedades en cuanto a retraso, ruido, etc. que se muestran en la siguiente tabla. Se puede notar que la posición por visión es una fuente muy precisa de posición, pero sin embargo tiene un gran retraso desde que se toma la imagen

hasta que se procesa, como suele suceder en la práctica.	Sensor	Retraso (ms)	Ruido
	acelerómetro	0	
	giróscopo	0	
	GNSS		
	Posición por visión	30	0.03

En la primera ejecución del estimador, después de inicializar los estados, se toma una medida de la IMU (acelerómetro y giróscopo). El EKF todavía no la utiliza, si no que la guarda en su buffer. Conforme llegan nuevas medidas, las que ya estaban en el buffer se van desplazando hacia la derecha, hasta que llegan a la última celda y entonces son usadas por el EKF para estimar los estados. Estos estados y las medidas utilizadas para estimarlos se refieren al *horizonte de tiempo retrasado*.

Pasan algunos ciclos más hasta que en el instante 40ms llega la primera medida de la visión, pero esta no se coloca junto con las medidas más recientes de la IMU, si no que se lleva directamente a la última celda. En esta se encuentran también las medidas de la IMU tomadas en el instante 10ms, es decir hace 30 ms que coincide con el retraso que tiene la posición visual con respecto a la IMU. De esta manera se agrupan las medidas que se refieren al mismo instante físico, es decir, el instante en el que llegaron compensándose su retraso.



De forma paralela se ejecuta el *filtro de salida* que solamente utiliza las medidas de la IMU, en este caso las que se generan más recientemente. Los estados de este último filtro, la posición, velocidad y orientación, se han estado guardando en el *buffer de salida*. De este buffer se cogen los estados más antiguos y se compara con los estados generados por EKF. Su diferencia se multiplica por una ganancia se le suma a todos los elementos del buffer de salida.

### 1.1.1 1.1.1 Detalles de implementación

- La ganancia que multiplica la diferencia entre el filtro de salida y el EKF y que sirve para corregir los estados, se calcula de manera el sistema controlado tenga un factor de amortiguamiento de 0.7

$$K_p = \frac{0.5}{Retraso} \quad (1.1)$$

Buscar la deducción hasta esta expresión

## 1.2 EKF para modelo bidimensional

Se va aplicar a un quadrotor en 2 dimensiones, pero el modelo al no ser dinámico, se podría aplicar a cualquier otro móvil.

Estados:

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ V_x \\ V_y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Modelo de predicción (modelo cinemático, no dinámico):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}_k \Delta t \quad (1.3)$$

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}_k + \Delta t \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \mathbf{a} + \begin{bmatrix} 0 \\ -mg \end{bmatrix} \Delta t \quad (1.4)$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta t \omega \quad (1.5)$$

Jacobiano del modelo de predicción:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t (-a_x \sin \theta + a_y \cos \theta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t (-a_x \cos \theta - a_y \sin \theta) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Jacobiano del acelerómetro y el giróscopo

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \Delta t \cos \theta & \Delta t \sin \theta & 0 \\ -\Delta t \sin \theta & \Delta t \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Matriz de covarianzas de la predicción:

$$Q = G \begin{bmatrix} \sigma_a^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_a^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\omega^2 \end{bmatrix} G^T \quad (1.8)$$



# Índice de Figuras

---



## Índice de Tablas

---

