



Master en Ingeniería de Sistemas y de Control

Control del seguimiento de trayectorias de un
vehículo autónomo cuatrirrotor

ALUMNO: José Manuel Tur Ortega

DIRECTORA: Matilde Santos Peñas

Curso 2011/12 - Convocatoria de junio



Master en Ingeniería de Sistemas y de Control

Control del seguimiento de trayectorias de un
vehículo autónomo cuatrirrotor

Proyecto Tipo A

ALUMNO: José Manuel Tur Ortega

DIRECTORA: Matilde Santos Peñas



Autorización

Autorizamos a la Universidad Complutense y a la UNED a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a sus autores, tanto la memoria de este Trabajo Fin de Master, como el código, la documentación y/o el prototipo desarrollado.

Firmado: José Manuel Tur Ortega

Firma del alumno

Resumen

El presente trabajo se ha realizado como respuesta a la primera fase del Benchmark 2011-2012 del Grupo de Ingeniería de Control del Comité Español de Automática. El objeto del mismo era doble: por un lado la obtención de un modelo del vehículo cuatrirrotor, y por otro el diseño de un controlador para el seguimiento de trayectorias en un plano de altura constante. El vehículo objeto de estudio es un Ar.Drone, vehículo aéreo no tripulado de la marca Parrot.

La información de partida para desarrollar el proyecto proviene de la simulación de un experimento realizada por la organización con su propio modelo no lineal del vehículo cuatrirrotor. Además ha sido posible solicitar la simulación de un experimento diseñado por nosotros. Los datos suministrados son una matriz formada por las variables: tiempo, Ref_Pitch, Ref_Roll, x , v_x , y , v_y . Las variables manipuladas son Ref_Pitch y Ref_Roll, consignas de los ángulos Pitch y Roll del vehículo (ángulos de cabeceo y balanceo, respectivamente); ambas son adimensionales y toman valores entre -1 y 1. Las variables controladas son las posiciones (x,y) y velocidades (v_x,v_y) del movimiento del vehículo en un plano de altura constante.

A partir de ambos experimentos se ha identificado un modelo del vehículo cuatrirrotor. Para ello hay que tener en cuenta que el vehículo incorpora de serie unos bucles internos de control que prácticamente desacoplan las velocidades según los ejes x , y , z . En conclusión, se trataba de realizar un modelo, bajo el punto de vista caja negra, del vehículo en sí. Dicho modelo se ha tomado como referencia para diseñar e implementar en Matlab© un controlador para el seguimiento de trayectorias de puntos.

La misma organización ha suministrado sendos scripts en Matlab© que permiten evaluar cuantitativamente los modelos y controladores desarrollados, ayudando con esto a la selección de los mejores. Los criterios de valoración del modelo son los errores absolutos medios y errores máximos en ambas direcciones, x e y . Para la evaluación del controlador se valora el seguimiento de una trayectoria determinada por un conjunto de puntos, tomando como criterios el error medio, el error máximo, y el tiempo de ensayo.

Los resultados obtenidos han sido muy satisfactorios, especialmente en el apartado del control. De hecho la propuesta ha sido elegida entre las 6 mejores de la Fase 1 del Benchmark (de un total de 21) y, por tanto, con derecho a participar en la Fase Final.

Palabras clave: Vehículo autónomo cuatrirrotor, Modelado, Identificación, Control fuzzy, Control multivariable.

Índice

1. Introducción	5
1.1. Motivación	5
1.2. Objetivos	5
1.3. Descripción detallada de la Fase 1 del concurso	6
1.3.1. Descripción del ensayo	6
1.3.2. Datos del ensayo	7
1.3.3. Identificación del modelo	8
1.3.4. Control	9
1.3.5. Evaluación de las diferentes propuestas	10
1.4. Estructura de este documento	11
2. Estado del arte	13
3. Identificación y modelado del cuatrirrotor de estudio	15
3.1. Modelado del cuatrirrotor	15
3.1.1. Movimiento vertical	15
3.1.2. Roll - Balanceo	15
3.1.3. Pitch - Cabeceo	16
3.1.4. Yaw - Guiñada	17
3.1.5. Movimiento plano	17
3.1.6. Flujo inducido - <i>Induced flow</i>	17
3.2. Descripción del Ar.Drone	18
3.3. Datos suministrados por la organización	19
3.4. Análisis cualitativo de la información disponible	19
3.5. Proceso de identificación del modelo	22
3.5.1. Preproceso de datos	22
3.5.2. Filtrado de datos	22
3.5.3. Datos de identificación y de validación	23
3.5.4. Selección de los tipos de modelo	23
3.5.5. Estimación de los parámetros del modelo.	23

3.5.6. Validación del modelo	23
3.6. Modelos obtenidos	24
3.6.1. Modelos lineales	24
3.6.2. ANFIS	25
3.6.3. Redes Neuronales	28
3.6.4. Modelos No Lineales	28
3.6.5. Conclusiones y selección del modelo	30
4. Controladores	32
4.1. Especificaciones de control	32
4.2. Variables de control	33
4.3. Dirección del movimiento	33
4.4. Velocidad de desplazamiento	33
4.4.1. Consideraciones sobre la velocidad máxima	34
4.5. Controladores diseñados	35
4.5.1. Control fuzzy	35
4.5.2. Control de tipo lineal	36
4.6. Resultados obtenidos y conclusiones	40
5. Conclusiones	43
5.1. Resultados de la primera fase del Benchmark 2011-12	44
5.2. Trabajos futuros	45

Índice de figuras

1.1. Esquema del vehículo cuatrirrotor	6
1.2. Sistema de referencia del cuatrirrotor	7
1.3. Modelo del cuatrirrotor a identificar	9
1.4. Estructura del controlador a diseñar	9
2.1. Diferentes modelos de Cuatricópteros comerciales. a) Microdrone, b) Draganflyer, c) Ar.Drone	14
3.1. Cuatrirrotor en estado estacionario o movimiento vertical	16
3.2. Movimiento de balanceo: desplazamiento según el eje y	16
3.3. Movimiento de cabeceo: desplazamiento según el eje x	17
3.4. Efecto del <i>induced flow</i>	18
3.5. Vista del Ar.Drone con la carcasa	18
3.6. Relación de las variables Ref_Pitch y vx	20
3.7. Relación de las variables Ref_Roll y vy	20
3.8. Capas en la estructura ANFIS	26
3.9. Resultados del modelo obtenido con ANFIS de vx	27
3.10. Modelo para vx obtenido con ANFIS	27
3.11. Resultados del modelo obtenido con ANFIS de vy	28
3.12. Errores del modelo frente a los datos experimentales	30
3.13. Comparativa del modelo no lineal de vx y los resultados experimentales	31
3.14. Comparativa del modelo no lineal de vy y los resultados experimentales	31
4.1. Control de la dirección del movimiento	34
4.2. Desviación de la línea recta en trayectorias oblicuas	36
4.3. Trayectoria seguida con el control fuzzy	36
4.4. Curvas de relación de las velocidades con las consignas	37
4.5. Trayectoria seguida con el contro lineal definitivo	41
4.6. Consignas generadas por el controlador	42

Índice de tablas

3.1. Parámetros del modelo ML1	24
3.2. Parámetros del modelo ML2	25
3.3. Parámetros del modelo ANFIS de v_y	28
3.4. Resultados del modelo no lineal para v_x y v_y	30
4.1. Resultados del controlador fuzzy	37
4.2. Valores iniciales y finales del control de tipo lineal	38
4.3. Valores de los parámetros del control de velocidad	41
4.4. Comparativa de los controladores lineales	41
5.1. Resultados de la primera fase del Benchmark 2011-2012 del CEA	44

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La idea del proyecto surge de la convocatoria del Benchmark 2011-2012 del Grupo de Ingeniería de Control del Comité Español de Automática. Como viene siendo habitual se plantea una cuestión relacionada con la Ingeniería de Control que sirva de motivación para los estudiantes y que a su vez ayude a difundir el campo de la ingeniería de control.

El Benchmark está estructurado en forma de concurso con tres fases. La primera fase consiste en la identificación de un modelo y la realización de un controlador para el seguimiento de trayectorias por parte del vehículo cuatrirrotor. La segunda fase concretará la implementación del controlador, el protocolo de ajuste, y las pruebas finales con el vehículo real. La tercera y última fase será la competición.

El concurso está organizado de manera que sólo los seis mejores equipos de la primera fase acceden a la segunda fase. Para la primera fase ha habido una inscripción de 22 equipos de diferentes universidades de 4 países. Finalmente se han presentado las propuestas de 16 equipos.

1.2. Objetivos

El objetivo del presente proyecto era participar en la primera fase del concurso. Es decir, consistía en:

1. Obtener un modelo del cuatrirrotor.
2. Obtener un controlador para el cuatrirrotor.
3. Documentar el desarrollo.

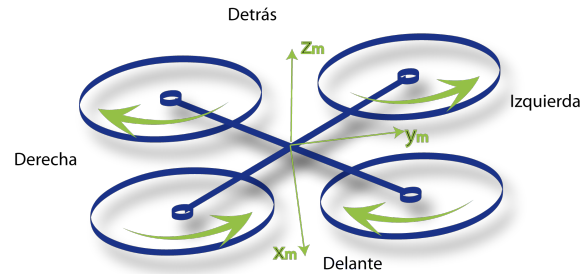


Figura 1.1: Esquema del vehículo cuatrirrotor

Dichos objetivos permiten utilizar el concurso para Proyectos de Fin de Master, desarrollando los conocimientos adquiridos durante en mismo. El planteamiento inicial del proyecto era utilizar los conocimientos adquiridos en la asignatura de Control Inteligente del Master tanto para la realización del modelo como para el controlador. Para el modelo se ha trabajado con la herramienta ANFIS, y para el control se ha trabajado con controladores de tipo Fuzzy.

Finalmente, los objetivos últimos del proyecto eran obtener el mejor modelo y el mejor controlador posibles para el sistema planteado.

1.3. Descripción detallada de la Fase 1 del concurso

1.3.1. Descripción del ensayo

El vehículo de estudio es un cuatrirrotor modelo Ar.Drone de la marca Parrot. La organización ha desarrollado un modelo no lineal de la dinámica del mismo, con el que es posible obtener simulación de su comportamiento.

El desplazamiento del vehículo se consigue modificando las velocidades de rotación de cada uno de sus 4 rotores. Los rotores en oposición giran en el mismo sentido, uno de los pares giran en sentido horario y el otro par en sentido antihorario. Las maniobras se consiguen cambiando los ángulos de cabeceo (giro alrededor del eje y , *pitch*) y de alabeo (giro alrededor del eje x , *roll*).

El dispositivo dispone de una unidad inercial de bajo coste a partir de la cual se estiman los ángulos de *pitch* y *roll*. Así mismo, el algoritmo de estimación que viene incorporado en el vehículo calcula la posición y velocidad respecto al sistema de referencia situado en el centro de gravedad del sistema. Además el dispositivo incorpora un sensor de ultrasonidos que permite conocer la altura a la que se encuentra. Por último, el cuatrirrotor presenta una cámara cenital que enfoca al suelo mediante la cual se calcula la velocidad respecto al suelo. Este pseudosensor es empleado en las maniobras de vuelo estacionario (*hovering*) y configuración del punto de equilibrio (*trimming*). El vehículo incorpora todos los sistemas de control básico

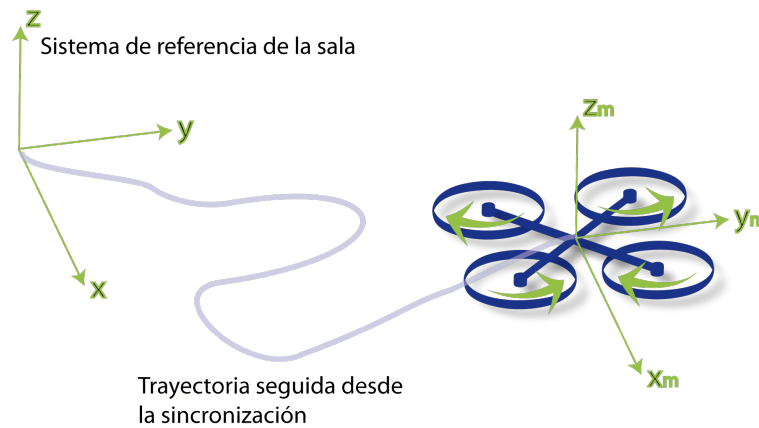


Figura 1.2: Sistema de referencia del cuatrirrotor

para la realización de las maniobras elementales de seguridad:

1. Cuando detecta la batería baja, aterriza automáticamente.
2. El despegue y el aterrizaje son realizados automáticamente cuando se lanza la orden.
3. Existe la opción de mantener flotando el dispositivo (*hovering*) simplemente con lanzar la instrucción.

El vehículo dispone de unos bucles de control internos que facilitan el guiado del mismo. Dichos controladores internos desacoplan casi por completo las velocidades según los tres ejes coordenados x_m, y_m, z_m , solidarios al vehículo. El objetivo final del proyecto es diseñar un controlador que permita el seguimiento de trayectorias prefijadas dentro de un plano de altura constante.

1.3.2. Datos del ensayo

En la fase inicial de cada vuelo el vehículo despegar, se estabiliza en un punto y ahí se fija el sistema de coordenadas de la sala xyz . Obviamente en ese instante coincidirá con el sistema de coordenadas del vehículo $x_my_mz_m$. A partir de ese momento empiezan los ensayo y los sensores suministrarán posiciones y velocidades en el sistema de coordenadas de la sala, xyz (ver Figura 1.2). Por tanto, para todas las pruebas del concurso sólo se dará acceso a las variables de referencia de los bucle de control básicos Ref_Pitch y Ref_Roll para conseguir desplazamiento en el plano xy .

En concreto los resultados obtenidos de la simulación se presentan en un archivo con 7 columnas de datos con las siguientes variables:

1. *Tiempo*.
2. *Ref_Pitch*.
3. *Ref_Roll*.
4. x .
5. y .
6. v_x .
7. v_y .

El periodo de muestreo es de 60 ms y la duración total del ensayo no superará los 12 minutos. Estas limitaciones se corresponden con la realidad del vehículo en la fase final de ensayos. El periodo de muestreo será de 60 ms y la duración de la carga de una batería es de unos 15-20 minutos, que descontando las operaciones de despegue, sincronización y aterrizaje, se reducen a unos 12 minutos de duración útil para el ensayo.

Ambas referencias *Ref_Pitch* y *Ref_Roll* son adimensionales y pueden variar en el rango $[-1,1]$, que se corresponden con los límites mínimo y máximo de inclinación fijados en el equipo para garantizar vuelos seguros. Por otra parte, la magnitud de las señales x e y , así como de las velocidades v_x y v_y , vienen expresadas en metros y metros/segundos respectivamente.

En la primera fase se ha suministrado un archivo de datos común a todos los equipos, pudiendo cada uno solicitar un ensayo personalizado siguiendo las mismas restricciones (periodo de muestreo y tiempo máximo).

1.3.3. Identificación del modelo

El objetivo de esta fase es la obtención de un modelo que describa la dinámica del vehículo cuatrirrotor lo mejor posible. Es decir, se pretende describir el comportamiento de las variables de posición (x, y, v_x, v_y) ante cambios en las referencias *Ref_Pitch* y *Ref_Roll*. Como se ha indicado los datos disponibles provienen de un modelo no lineal de la organización que será el mismo que se utilizará para evaluar la calidad del modelo presentado.

Para la identificación se debe partir del supuesto de caja negra. Es decir, de una caja con dos entradas y cuatro salidas conocidas que pueden ser usadas para identificar el modelo (ver en la Figura 1.3).

El resultado debe ser un modelo en formato Simulink[®]: un bloque con dos entradas y con cuatro salidas etiquetadas con los nombres de las variables *Ref_Pitch* y *Ref_Roll* para las entradas, y x, y, v_x, v_y para las salidas.



Figura 1.3: Modelo del cuatrirrotor a identificar

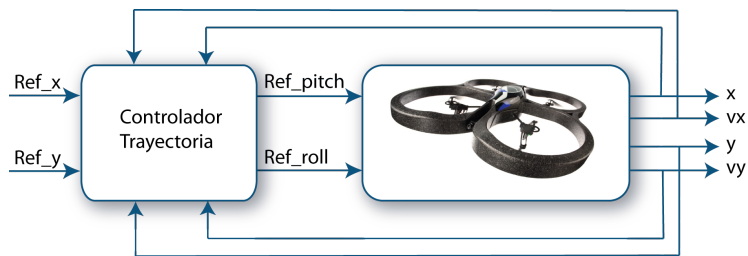


Figura 1.4: Estructura del controlador a diseñar

1.3.4. Control

El objetivo del proyecto es diseñar un control que permita llevar al vehículo a lo largo de una trayectoria poligonal preestablecida a la mayor velocidad y con la máxima precisión posible. Un punto de la trayectoria se considera alcanzado siempre que se entre en un radio de 20 cm a su alrededor, en cuyo momento se activa el siguiente punto de la trayectoria. Y así sucesivamente hasta finalizar el recorrido establecido. Los errores de la trayectoria se calculan sobre la línea recta que une dos puntos consecutivos de la trayectoria. El tiempo de vuelo se detiene en el momento de entrar en el radio de acción del último punto de la trayectoria.

El objetivo de esta parte es obtener un controlador que, con las medidas disponibles (recordemos que son x, y, v_x, v_y), actúe sobre las variables manipuladas (Ref_Pitch y Ref_Roll) para conseguir el mejor seguimiento posible de trayectorias sobre el plano xy de altura constante.

El resultado debe ser un controlador en formato Simulink[®]: un bloque con seis entradas y con dos salidas etiquetadas con los nombres de las variables correspondientes, tal y como se puede apreciar en la Figura 1.4.

1.3.5. Evaluación de las diferentes propuestas

La valoración de los resultados se realiza cuantitativamente por medio de dos scripts en Matlab© suministrados por la organización que permiten valorar tanto la bondad del modelo como la capacidad del controlador para seguir las trayectorias preestablecidas. Para ello se obtiene un coeficiente global que considera los siguientes parámetros:

1. Evaluación del modelo:
 - a) Error absoluto medio según el eje x.
 - b) Error absoluto medio según el eje y.
 - c) Error absoluto máximo según el eje x.
 - d) Error absoluto máximo según el eje y.
2. Evaluación del controlador:
 - a) Error medio durante la trayectoria.
 - b) Error máximo durante la trayectorias.
 - c) Tiempo de vuelo para completar la trayectoria.

Un valor 0 indicaría un modelo y un control perfectos y, por tanto, inalcanzables. Cuánto más grande sea el valor obtenido peor es el modelo o el controlador. Hay que tener en cuenta que esta valoración es altamente no lineal, cosa que hay que considerar a la hora de realizar comparaciones, ya que un empeoramiento pequeño (bien sea del modelo o bien sea del control) puede implicar grandes incrementos en el coeficiente.

Para la evaluación del modelo se suministra un script llamado *simuladorModelo.m* y un modelo *ComparadorModelo_continuo.mdl* de Simulink© en el cual se ha de insertar un bloque correspondiente al modelo obtenido. A partir de aquí, el script compara los datos obtenidos en el ensayo de la organización con los datos que ofrece el modelo introducido para las consignas del ensayo. Esto permite comparar el modelo respecto a los datos del ensayo. Dicha comparación se visualiza de tres formas diferentes. Por un lado aparecen graficados los valores del ensayo frente a los del modelo, cosa que permite valorar cualitativamente el modelo considerado. En segundo lugar aparecen gráficos con los errores del modelo frente a los datos del ensayo en cada instante, pudiendo apreciar en detalle en qué zona o zonas el modelo se ajusta mejor o peor. Finalmente, se ofrecen los parámetros cuantitativos ya indicados, así como un valor denominado GPP que valora globalmente el modelo [3]. Todos estos gráficos y parámetros se utilizarán en el apartado de identificación y se tomarán como referencia para la elección del mejor modelo.

Para la evaluación del controlador se dispone de un script llamado *simulaControl.m* y un modelo de Simulink® llamado *simulaControlCuatrirrotor.mdl*. En este caso hay que introducir el bloque obtenido del modelo así como el bloque diseñado para el controlador. Esta estructura significa que nuestro controlador se evalúa con el modelo obtenido anteriormente, cosa que condiciona su diseño. En efecto, será conveniente que el controlador sea parametrizable para que se pueda ajustar fácilmente cuando se disponga del modelo utilizado por la organización en la siguiente fase del concurso.

En el script de evaluación del control se puede definir una trayectoria por medio de los diferentes puntos que se deben alcanzar según el orden deseado. De esta manera se simula el desempeño del controlador con el modelo obtenido para el seguimiento de diferentes trayectorias, cosa que permite valorar su mejor o peor funcionamiento según diferentes direcciones de movimiento. Igual que en el caso anterior se presentan diferentes gráficas, de las cuales las más importantes son la trayectoria real del vehículo respecto a la línea poligonal que sería la trayectoria ideal, y el error cometido en cada punto de dicha trayectoria. La valoración cuantitativa se ofrece por medio de los parámetros comentados anteriormente, así como la valoración global GPP [3]. Todos estos gráficos y parámetros se utilizarán en el apartado de control para seleccionar el mejor de los controladores diseñados.

Para la Fase 1 del concurso, además de los dos bloques Simulink® (uno para el modelo y otro correspondiente al controlador), se debe realizar un documento de no más de 6 páginas en formato artículo de las Jornadas de Automática describiendo tanto el proceso de identificación del modelo como el de diseño del controlador.

1.4. Estructura de este documento

Se realiza un somero recorrido por el estado de la técnica actual sobre cuatrirrotores autónomos en el capítulo 2.

En el capítulo 3 se realiza una descripción del proceso de identificación del modelo. Partiendo del planteamiento inicial del proyecto (utilización de ANFIS), los conocimientos sobre la dinámica del vehículo (otros estudios sobre el mismo), y el análisis cualitativo de la información disponible (datos de partida del Benchmark) se han obtenido una serie de pautas para la identificación del modelo. De los diferentes modelos obtenidos, se presentan los más significativos y se compararan sus resultados.

A continuación, en el capítulo 4, se discute la técnica de control. Se han implementado varios controladores con diferentes técnicas, y se comparan sus resultados, justificando la elección del presentado al concurso.

Finalmente, en el capítulo 5, se presentan las principales conclusiones del mismo,

propuestas de mejora sobre el controlador diseñado, y las próximas tareas relativas a la investigación.

Capítulo 2

Estado del arte

En los últimos años el desarrollo de vehículos aéreos autónomos (*UAV*, Unmanned Aerial Vehicles) ha visto un gran estudio y desarrollo. Y también en el caso concreto de los cuatrirrotores. Esto es debido a que presentan una serie de ventajas frente a otros vehículos aéreos [10]:

1. El despegue y el aterrizaje son verticales, lo cual da gran flexibilidad para su uso en exteriores o interiores, con la ventaja que esto tiene respecto al control del entorno.
2. Las únicas partes móviles son las hélices, reduciendo a la mínima expresión la posibilidad de fallos mecánicos.
3. No existe necesidad de ningún tipo de servomecanismo, ya que las hélices están directamente acopladas a los ejes de los motores impulsores.
4. La arquitectura de cuatro hélices estabiliza y simplifica el control del vehículo, permitiendo un desacople importante entre los diferentes subsistemas.

No hay que obviar, sin embargo, su principal inconveniente: no es muy adecuado para trasladar pesos. Esto mismo hace que su autonomía sea reducida, ya que el peso admisible para las baterías es pequeño.

Todo ello redonda en una estructura simple, robusta, y de bajo coste de construcción y operación, convirtiéndolos en vehículos ideales para la investigación. Y también empiezan a hacer su aparición los vehículos con fines comerciales (ver Figura 2.1), como por ejemplo el Microdrone (de GmbH), los diferentes modelos de Draganflyer (de Draganfly Innovations Inc.), o nuestro Ar.Drone (de Parrot).

Se han probado diferentes estrategias de control para estos vehículos [1]: control lineal, linealización por realimentación, control predictivo, por modos deslizantes, control robusto, algoritmos de aprendizaje, algoritmos genéticos, algoritmos adaptativos, control fuzzy, control por redes neuronales, y por Lyapunov.



Figura 2.1: Diferentes modelos de Cuatricópteros comerciales. a) Microdrone, b) Draganflyer, c) Ar.Drone

En [6] se describe en detalle la cinemática del cuatrirrotor, mientras que en [5] se explicitan las fuerzas implicadas en el vuelo del mismo. También existen buenos estudios combinados de la cinemática y la dinámica ([9], [4]). A partir de todos estos estudios es posible obtener un modelo no lineal de la dinámica del cuatrirrotor que gobierna sus movimientos. Además, en [7] tenemos un análisis específico de nuestro cuatrirrotor, el Ar.Drone, que nos ha permitido conocer con mayor detalle el equipamiento y funcionamiento del mismo.

Por último, referente a las estrategias de control, contamos con algunos estudios como [8] y [11] que presentan los buenos resultados de la aplicación del control fuzzy a estos vehículos.

Toda esta información previa nos ha permitido conocer en detalle cómo funciona un cuatrirrotor y qué efectos influyen en su vuelo.

Capítulo 3

Identificación y modelado del cuatrirrotor de estudio

3.1. Modelado del cuatrirrotor

Como se ha indicado anteriormente nuestro vehículo tiene un movimiento en el espacio con 6 grados de libertad. Vamos a describir cómo se controla el vuelo del vehículo. En la Figura 3.1 tenemos una representación esquemática del cuatrirrotor en vuelo. Como se ve los rotores en oposición giran en el mismo sentido y los otros dos en sentido contrario. En estado estacionario todos giran a la misma velocidad, de manera que el empuje de las hélices contrarresta el peso del vehículo y se mantiene estable en una posición.

3.1.1. Movimiento vertical

Este movimiento es el más sencillo. Si se quiere ir hacia arriba se aumenta la velocidad de rotación de todas las hélices en la misma cantidad y el vehículo seguirá una trayectoria hacia arriba. Si se desea descender sólo hay que reducir dicha velocidad.

3.1.2. Roll - Balanceo

El movimiento de *Roll* o balanceo se produce cuando hay un giro alrededor del eje x solidario al centro de masas de vehículo. Para conseguir este movimiento es preciso incrementar la velocidad de rotación de los dos rotores situados delante o detrás del eje x , según se quiera obtener un movimiento positivo o negativo. Siguiendo el ejemplo de la Figura 3.2, aumentando la velocidad de rotación de los rotores 2 y 3 obtendríamos un movimiento de balanceo positivo. Como se ve, esta inclinación hace que el empuje se descomponga en dos fuerzas: una vertical y otra horizontal según el eje y y negativo. De aquí surge la relación que hace que para consignas `Ref_Roll`

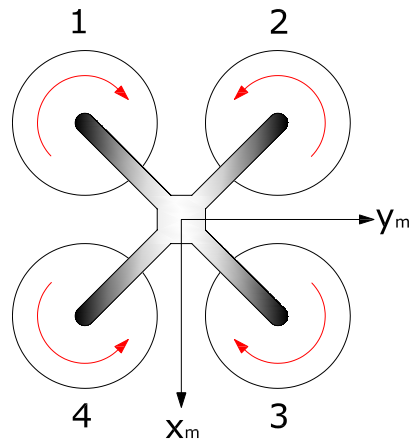


Figura 3.1: Cuatrirrotor en estado estacionario o movimiento vertical

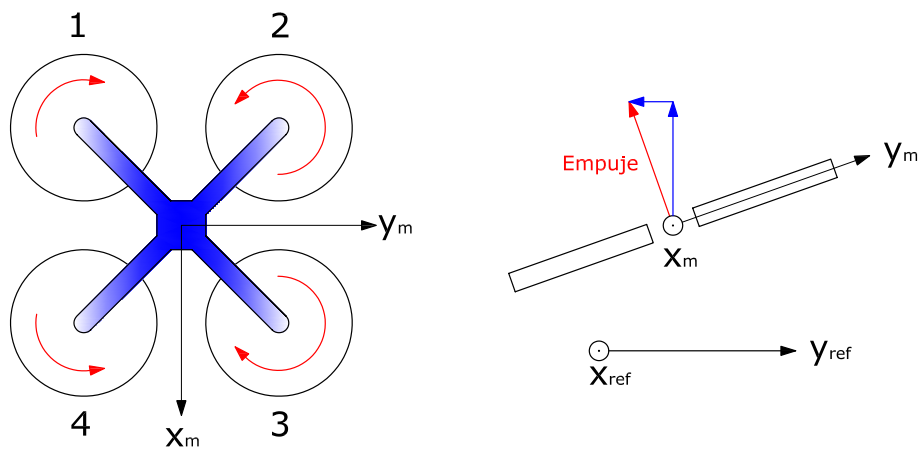


Figura 3.2: Movimiento de balanceo: desplazamiento según el eje y

positivas se produzcan desplazamientos según el eje y negativo. Análogamente podremos conseguir desplazamientos según el eje y positivo con consignas de Ref_Roll negativas. Si no se desea que el vehículo varíe su movimiento vertical simplemente habrá que reducir la velocidad de los otros dos rotores para que el empuje vertical permanezca constante. En conclusión, hemos visto que el balanceo (*roll*) de nuestro cuatrirrotor nos sirve para controlar su movimiento según el eje y.

3.1.3. Pitch - Cabeceo

De forma similar es posible controlar el cabeceo o *pitch* del cuatrirrotor. En el ejemplo de la Figura 3.3 vemos que incrementando la velocidad de rotación de las hélices 1 y 2 el vehículo sufrirá un cabeceo positivo. Igual que antes se produce una descomposición del empuje de las hélices haciendo que el vehículo avance, en este

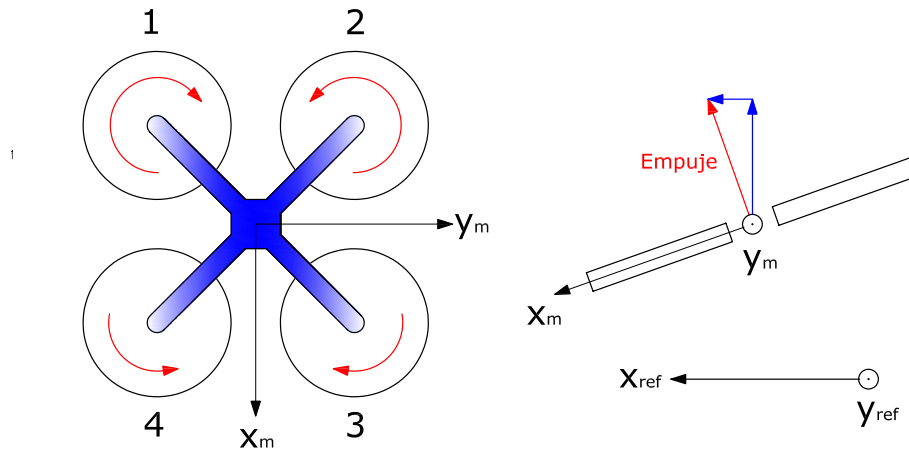


Figura 3.3: Movimiento de cabeceo: desplazamiento según el eje x

caso, según el eje de las x positivas. De aquí surge la relación entre la consigna Ref_Pich y el movimiento según el eje x. Como antes, si se quiere mantener la altura constante simplemente habrá que disminuir adecuadamente la velocidad de rotación de los rotores 3 y 4.

3.1.4. Yaw - Guiñada

El movimiento de guiñada o *yaw* se puede controlar por la relación entre las velocidades angulares de los rotores 1-3 con los 2-4. Si se incrementa la velocidad del par 1-3 y se disminuye en la misma cantidad la del par 2-4 el empuje no variará, con lo que la altura del cuatrirrotor no variará, pero sí que habrá un par según el eje z positivo. Esta combinación nos permitiría *girar* el vehículo, es decir cambiar la orientación del vehículo según el eje z.

3.1.5. Movimiento plano

Como se ha visto, es relativamente sencillo realizar vuelos de altura constante, que son el objeto de estudio del presente trabajo. Como se ha visto aparece una clara relación entre Ref_Roll y el movimiento según el eje x, y entre Ref_Pitch y el movimiento según el eje y.

3.1.6. Flujo inducido - *Induced flow*

Existe un fenómeno que hace que en el movimiento vertical del helicóptero la aceleración no sea constante. Al aumentar su velocidad vertical, el mismo helicóptero desplaza aire de arriba hacia abajo, de manera que se genera un flujo de aire en sentido vertical hacia abajo (ver Figura 3.4). Este flujo hace que eficiencia aerodinámica

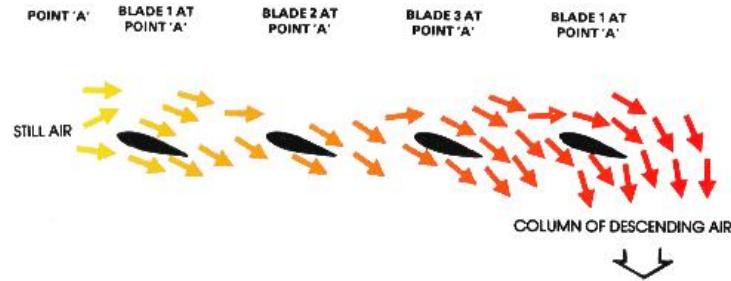
Figura 3.4: Efecto del *induced flow*

Figura 3.5: Vista del Ar.Drone con la carcasa

disminuya al cambiar el ángulo de incidencia del aire, disminuyendo el empuje y, por tanto, la aceleración vertical obtenida con la misma rotación de las hélices disminuye. Esto a su vez reduce el flujo vertical de aire aumentando la aceleración. Así se llega a un equilibrio. De manera que este efecto explica el comportamiento observado en este tipo de vehículos: al final la velocidad vertical se estabiliza para un valor de constante de rotación de las hélices.

3.2. Descripción del Ar.Drone

A continuación haremos una breve descripción del vehículo de estudio, el Ar.Drone de Parrot [12] (ver Figura 3.5). En primer lugar decir que se trata de un cuadricóptero hecho de fibra de carbono y plástico PA66 de gran resistencia. Se controla por medio de una conexión Wifi b/g, con un aparato bajo el sistema operativo *iOS* o *Android*. El Ar.Drone está equipado con cuatro motores tipo brushless de alta eficiencia, alimentados por una batería de litio de 11.1 V y 1000 mAh que le confiere una autonomía de vuelo de aproximadamente 12 minutos. Dispone de una carcasa para proteger las hélices en vuelos interiores. Su masa es de 380/420 g (sin/con carcasa).

Para la navegación cuenta con diferentes cámaras y sensores. En la parte frontal cuenta con una cámara gran angular (93°) con resolución VGA (640x480 pixeles).

En la parte inferior cuenta con otra cámara (63°) que permite su estabilización. Además, en la misma parte inferior, cuenta con un sensor de ultrasonidos a 40 kHz para estimar la altura en un rango de 0-6 m. Finalmente, dispone de un acelerómetro de 3 ejes, un giróscopo de 2 ejes (balanceo y cabeceo), y un giróscopo de precisión para el ángulo de guiñada. Es capaz de alcanzar una velocidad máxima de 5 m/s.

Cuenta con rutinas despegue y aterrizaje automático. El despegue estabiliza el vehículo a 50 cm de altura sobre el suelo. Si se pierde la señal de control se activa el piloto automático en modo sobrevuelo (*hovering*) y, si no se recupera, aterriza tras unos segundos.

3.3. Datos suministrados por la organización

Como se ha indicado la organización ha suministrado un conjunto de datos correspondientes a un ensayo de un vuelo de 12 minutos (720 s). A partir de dicho ensayo se han realizado las gráficas que presentan la interacción entre las variables Ref_Pitch - v_x (Figura 3.6), y Ref_Roll- v_y (Figura 3.7).

En la Figura 3.6 podemos ver la relación entre la entrada Ref_Pitch y la salida v_x . En primer lugar vemos que la relación es negativa, es decir, un valor positivo de consigna conlleva una velocidad de avance negativa. Esto es debido a la definición del sistema de referencia solidario al vehículo, que en este caso tiene el eje z orientado hacia abajo, según es habitual en vehículos aéreos. Dicha orientación, denominada NED (North-East-Down, por sus siglas en inglés), hace que cambien los sentidos de x e y. Además, es posible apreciar una saturación de la velocidad v_x en un valor alrededor de 3 m/s. Dicha velocidad se alcanza con valores de consigna superiores a 0,4, aproximadamente. Una ampliación de esta gráfica nos permite ver que existe cierta interrelación, aunque muy pequeña, entre Ref_Roll y v_x , ya que en la parte en que la consigna Ref_Pitch es nula aparece una respuesta oscilatoria, aunque pequeña, debida a la otra consigna.

La Figura 3.7 muestra la relación existente entre la variable de entrada Ref_Roll y la de salida v_y . En este caso vemos que la relación es positiva, por la orientación de los ejes, que es NED. Ahora la velocidad máxima de saturación es de un valor cercano a 2 m/s, y se alcanza cuando las señales de consigna superan 0,5, aproximadamente. También es posible apreciar, con una ampliación del rango apropiado, que existe una ligera interrelación de la velocidad v_y con la consigna Ref_Pitch.

3.4. Análisis cualitativo de la información disponible

Antes de empezar con el modelado se ha realizado un análisis previo de la información disponible en la bibliografía, así como de los datos aportados por la organi-

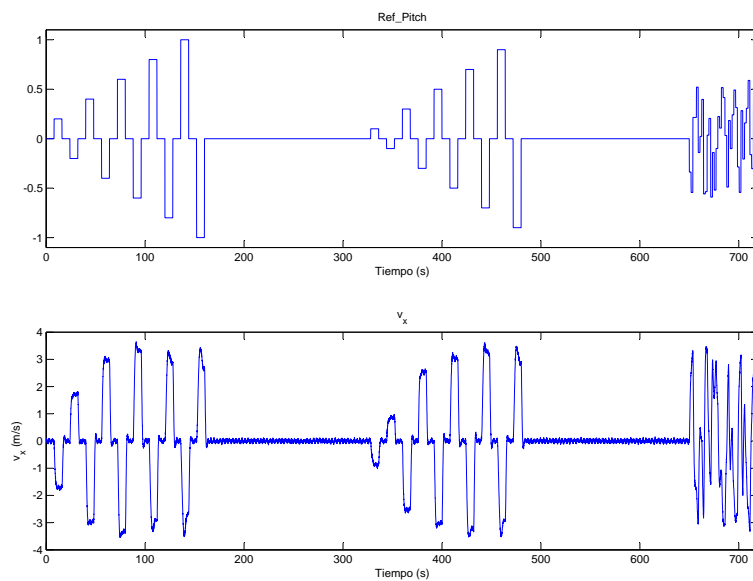


Figura 3.6: Relación de las variables Ref_Pitch y vx

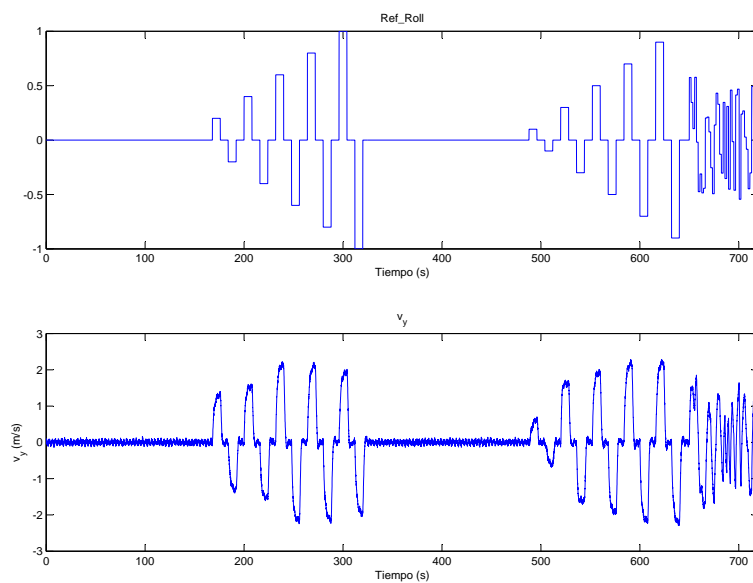


Figura 3.7: Relación de las variables Ref_Roll y vy

zación, del cual se han extraído las siguientes conclusiones:

1. De los 6 grados de libertad del vehículo sólo queremos modelar dos: los desplazamientos según los ejes x e y .
2. El vehículo no es simétrico, así que presenta dos dinámicas diferentes según el eje x o el eje y (ver apartado 3.3).
3. El modelo con el que se trabaja es no lineal, [2].
4. El modelo que hacemos incluye sus controladores internos [2], [7]. Es decir, modelamos el Ar.Drone como un sistema, con los valores deseados de (x,y) como entradas y los valores actuales de $(x, y, vx, vy, pitch, roll)$ como estados. Esto descarta atacar el problema por medio del modelado físico del sistema, ya que habría que modelar a su vez los controladores internos.
5. La posición del vehículo es una integración pura de la velocidad, así que debemos modelar (vx, vy) .
6. Los controles internos prácticamente desacoplan la interacción entre ejes [2]. Así que cabe suponer que modelos monovariantes den resultados aceptables.
7. Como el objetivo final del trabajo es diseñar un controlador para el seguimiento de trayectorias rectas entre distintos puntos, a priori parece que la estrategia de control debería generar señales escalonadas, más que de tipo semejante al pseudoaleatorio. Esto nos ha llevado a priorizar la parte escalonada de las variables manipuladas sobre la parte pseudoaleatoria, ya que en condiciones de trabajo será más adecuado.
8. Existen puntos de saturación para las velocidades, señal de que aparece el fenómeno de *induced flow*. Es decir, aumentar la consigna (inclinación) del vehículo no aumenta la velocidad del mismo. Para Ref_Pitch parece estar alrededor de 0,4, y para Ref_Roll alrededor de 0,5.
9. La velocidad máxima es diferente según la dirección del movimiento, debido a la asimetría del vehículo. Según el eje x la velocidad máxima es de unos 3 m/s, y según el eje y es de unos 2,15 m/s (ver Figuras 3.6 y 3.7). Esto da una velocidad máxima de aproximadamente 3,7 m/s, lejanos a los 5 m/s alcanzables según la documentación técnica del fabricante.
10. Los datos iniciales consisten en consignas desacopladas. Es decir, salvo en la zona pseudoaleatoria, una de las dos consignas siempre es cero. Al tratar con un modelo no lineal existe la posibilidad que la interacción de ambas modificara los valores anteriores. Para descartarlo se ha solicitado un segundo ensayo con

el modelo de la organización con consignas concurrentes. Este segundo ensayo nos ha permitido concluir que los valores máximos anteriores no dependen de la combinación de ambas consignas.

3.5. Proceso de identificación del modelo

Es bien sabido que para realizar un modelo matemático de un sistema se pueden utilizar dos enfoques:

1. El modelado físico, a partir de las leyes físicas.
2. La identificación, a partir de un conjunto de datos de entrada-salida.

Ambos enfoques no son incompatibles, así que será preciso intentar aprovechar los mejor de cada uno de ellos. Respecto al modelado físico se ha estudiado la bibliografía existente hasta contar con un conocimiento adecuado de la dinámica del sistema. Por otro lado, en nuestro caso disponemos de datos de entrada-salida, así que parece conveniente aprovecharlos por medio de la identificación con herramientas informáticas.

En el proceso general de identificación de modelos la parte de diseño del experimento y adquisición de los datos viene dada por la organización y sus datos de la Fase 1 del concurso. Nuestro trabajo se inicia con la fase de tratamiento de los datos.

3.5.1. Preproceso de datos

Como se ha indicado el fenómeno del flujo inducido hace que haya una limitación en la velocidad de avance, así que puede ser interesante tenerlo en cuenta a la hora de estimar los modelos. Esto se puede realizar fácilmente realizando una saturación de los datos de entrada a un valor apropiado, alrededor de 0,4 para Ref_Pitch y alrededor de 0,5 para Ref_Roll.

3.5.2. Filtrado de datos

Los datos obtenidos de los ensayos de la organización presentan ruido aleatorio que distorsiona las medidas reales. Como es bien sabido antes de poder identificar un modelo es preciso hacer un tratamiento previo de los datos. Como el periodo de muestreo es de 0,06 s, tomando como referencia la norma general de que esta frecuencia de muestreo sea 10 veces la máxima frecuencia de interés para el estudio, esta última resulta ser de unos 10 rad/s. En cualquier caso tras varias pruebas se ha visto que el límite óptimo de frecuencia de filtrado está entre 2 y 3 rad/s.

3.5.3. Datos de identificación y de validación

En el proceso de identificación es importante separar los datos experimentales disponibles para tener mayor certeza respecto a la representatividad del modelo obtenido. En nuestro caso, al existir la posibilidad de solicitar un segundo experimento, éste se puede utilizar de verificación. Además, según se han indicado anteriormente, es más relevante para el diseño la parte del experimento formada por consignas escalonadas que la parte pseudoaleatoria, así que se tomará la primera para la identificación del modelo.

3.5.4. Selección de los tipos de modelo

El planteamiento a la hora de identificar el modelo era comenzar obteniendo algunos modelos lineales, para tener una base y ver qué resultados se obtenían. Y después lanzarse a la identificación de un modelo con la herramienta ANFIS (Adaptive NeuroFuzzy Inference System o *Sistema de Inferencia Difusa basado en Redes Adaptativas*) que, en principio, se muestra muy adecuada para el caso que estamos trabajando, ya que:

1. Los conocimientos del sistema (modelos físicos) son incapaces de modelar el comportamiento de los controladores internos del vehículo cuatrirrotor, así que se hace necesario atacar el problema de identificación bajo otro punto de vista.
2. Se trata de identificar el modelo no lineal con el que trabaja la organización.
3. Permite trabajar con sistemas monovariantes o multivariantes, según sea necesario. En nuestro caso vimos que quizás los modelos monovariantes funcionen bien, pero en caso necesario, podremos pasar a identificar modelos con dos entradas.

3.5.5. Estimación de los parámetros del modelo.

Para la estimación de los distintos modelos se han utilizado diferentes Toolboxes de Matlab©. Por un lado *ident*, para identificar modelos lineales y no lineales. Por otro lado *anfis*, que permite la identificación y validación de modelos basados en el método ANFIS. Y finalmente, el *nnstart* para la creación y entrenamiento de redes neuronales.

3.5.6. Validación del modelo

Para la validación del modelo, a parte del contraste con el segundo experimento, se cuenta con un script en Matlab© suministrado por la organización [3] que permite obtener una valoración numérica de la consistencia del modelo obtenido con los

Var. dep.	Var. indep.	Frec. Filtrado	Saturación	Modelo	d_{max}	d_{med}
vx	Ref_Pitch	$\omega > 10$ rad/s	0,5	$\frac{-18,86}{s^2+2,498s+2,943}$	5,50	0,95
vy	Ref_Roll	$\omega > 10$ rad/s	0,5	$\frac{24,58}{s^2+6,904s+5,845}$	4,29	0,70

Tabla 3.1: Parámetros del modelo ML1

datos del experimento. Así, resulta sencillo valorar cuantitativamente el resultado obtenido. Dicha valoración se realiza por medio de cuatro medidas:

1. Distancia media según el eje x, d_{medx} .
2. Distancia máxima según el eje x, d_{maxx} .
3. Distancia media según el eje y, d_{medy} .
4. Distancia máxima según el eje y, d_{maxy} .

Es importante remarcar que esta valoración ofrece dos referencias:

1. Una absoluta: ya que un modelo idéntico al de la organización daría un resultado de 0, así que cuánto mayor sea el valor obtenido, peor es el modelo.
2. Una valoración relativa: al comprar distintos modelos permite ordenarlos según los resultados.

3.6. Modelos obtenidos

De entre los diferentes tipos de modelos estudiados, se presentan a continuación los que presentan mejores resultados. Después se realiza una comparativa de los resultados valorando la elección del modelo que se ha utilizado para el diseño del controlador.

3.6.1. Modelos lineales

Como se ha indicado antes se ha comenzado por la estimación de modelos lineales para ver qué resultados arrojan. En [7] se ha identificado un modelo de este tipo para el posterior diseño de un controlador y ha dado buenos resultados. De acuerdo a las consideraciones anteriores, se ha trabajado con los valores de la consigna del experimento, o bien con diferentes saturaciones. Bajo estas consideraciones, a continuación se presentan dos modelos monovariantes y sus resultados en las Tablas 3.1 y 3.2.

Comentar que también se ha probado un modelo con integrador partiendo de la pareja de datos (x,Ref_Pitch) y (y,Ref_Roll). La idea era que eliminando el integrador

Var. dep.	Var. indep.	Frec. Filtrado	Saturación	Modelo	d_{max}	d_{med}
vx	Ref_Pitch	$\omega > 2$ rad/s	0,4	$\frac{-24,23}{s^2+2,631s+3,074}$	3,29	0,54
vy	Ref_Roll	$\omega > 2$ rad/s	0,4	$\frac{33,31}{s^2+8,761s+7,247}$	3,45	0,81

Tabla 3.2: Parámetros del modelo ML2

nos quedase un modelo de vx y vy. Pero los resultados eran mucho peores, así que se han descartado.

3.6.2. ANFIS

En este trabajo se pretendía aplicar la filosofía ANFIS (*Adaptive Networks based Fuzzy Inference Systems*). Este sistema permite mapear sobre una estructura neuronal el sistema de inferencia difusa Takagi-Sugeno. Un sistema ANFIS integra las mejores características de los sistemas difusos y de las redes neuronales. De los sistemas difusos se utiliza la representación del conocimiento previo en un conjunto de restricciones (topología de la red) para reducir el espacio de búsqueda de optimización, y de las redes neuronales la adaptación a la propagación inversa a la red estructurada para automatizar la sintonización de los parámetros.

ANFIS es un método que permite ajustar un conjunto de reglas borrosas a partir de un algoritmo de aprendizaje basado en un conjunto de datos de entrenamiento. Dichos datos han de ser suficientemente dispersos para garantizar un buen funcionamiento. Pero no en exceso, o la red neuronal crece exponencialmente de tamaño.

En general la salida consiste en una interpolación lineal entre diversas salidas lineales borrosas. La arquitectura (ver Figura 3.8) consta de 5 capas:

1. En la primera las neuronas representan una función de activación paramétrica (parámetros de la premisa).
2. La segunda capa realiza el producto de todas las señales entrantes en cada región, que corresponde a una sentencia *if-then*. Es decir, calculan el peso de cada sentencia.
3. La tercera capa calcula los ratios de activación de cada regla del sistema borroso.
4. La capa 4 calcula las salidas ponderadas a partir de los coeficientes de las distintas funciones lineales (parámetros de consecuencia).
5. La capa 5 suma todos los nodos de la capa anterior, es decir, los interpola linealmente.

Como se ve en la arquitectura ANFIS Takagi-Sugeno se utilizan dos conjuntos de parámetros: los de la premisa (de la función de activación) y los de las consecuencias (coeficientes de cada función de salida lineal).

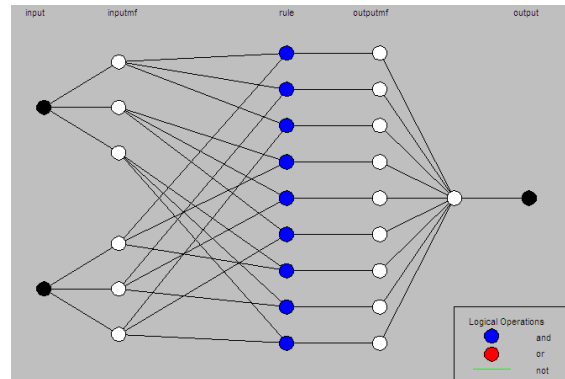


Figura 3.8: Capas en la estructura ANFIS

1. En las premisas (capa 2): representan las particiones difusas usadas en las reglas y por lo tanto los parámetros son los de las funciones de pertenencia de las entradas.
2. Los de las consecuencias (capa 4): los coeficientes de las funciones lineales de los consecuentes.

El proceso de aprendizaje avanza y retrocede sucesivamente. Partiendo de unas premisas se calculan las consecuencias, que se ajustan según el método de mínimos cuadrados, y luego se calculan los errores que se llevan hacia atrás para reajustar las premisas por métodos basados en el gradiente, y así sucesivamente hasta llegar a la precisión deseada.

Modelos con ANFIS

Trabajando con ANFIS se han obtenido diversos modelos, en varios escenarios:

1. Datos filtrados o no, con medias eliminadas o no.
2. Entradas monovariante o multivariante.
3. Considerando saturación en las entradas o no.

Modelo de vx

De todos los modelos obtenidos, el mejor modelo para vx presenta el aspecto que se ve en la Figura 3.9 respecto a los datos de validación. En dicha gráfica podemos ver que existe un valor de saturación que es bien reproducido por el modelo, aunque con mayor error para consignas más pequeñas. En cualquier caso, parece cualitativamente bueno. Sin embargo, cuando llevamos este modelo al script para evaluar el modelo frente a los datos obtenidos, los resultados son los que se ven en la Figura 3.10. En él se observan varias cosas:

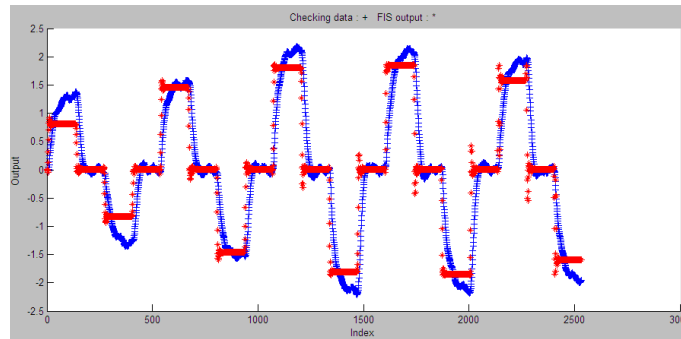


Figura 3.9: Resultados del modelo obtenido con ANFIS de vx

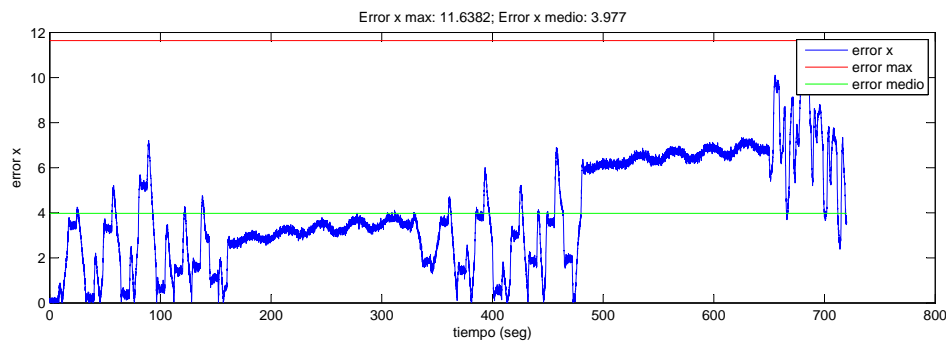


Figura 3.10: Modelo para vx obtenido con ANFIS

1. Los resultados numéricos obtenidos con el modelo por medio de ANFIS son mucho peores que con el modelo lineal.
2. El modelo presenta una deriva que no describe de forma correcta el comportamiento del vehículo durante el experimento.
3. Aún siendo posible corregir esta deriva posteriormente con un factor constante, la variabilidad da errores máximos hasta de 7 metros, cosa que muestra que este modelo no es en absoluto adecuado para nuestros fines.

Así pues, se considera que el modelo para vx obtenido con ANFIS ni es adecuado ni mejora el modelo que ya tenemos, así que no es apto para trabajar con él en aras de diseñar el controlador.

Modelo de vy

También se han obtenido diversos modelos para vy con ANFIS. En este caso los resultados obtenidos son mejores que para el caso de vx, aunque tampoco mejoran al modelo lineal. Podemos ver un resumen del mejor modelo obtenido en la Tabla 3.3,

Var. dep.	Var. indep.	Frec. Filtrado	Saturación	d_{max}	d_{med}
vy	Ref_Roll	$\omega > 3$ rad/s	0,9	3,37	0,84

Tabla 3.3: Parámetros del modelo ANFIS de vy

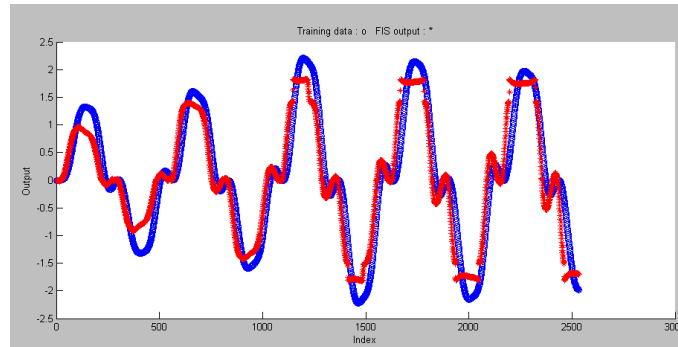


Figura 3.11: Resultados del modelo obtenido con ANFIS de vy

así como en la Figura 3.11. En esta última figura podemos observar que el modelo responde cualitativamente bien a los datos del experimento. También se aprecia la presencia del valor de saturación introducido. Igual que antes, tenemos una desviación mayor cuando las consignas son pequeñas. En conclusión, se ha considerado que no compensa introducir un modelo más complicado (ANFIS frente al lineal) para obtener resultados que no mejoran respecto al más sencillo.

3.6.3. Redes Neuronales

En vista de los malos resultados obtenidos con ANFIS se probó también la opción de obtener modelos con redes neuronales, a ver si presentaban mejores resultados. Se realizaron algunas tentativas (con redes *Levenberg-Marquardt backpropatation*), pero los resultados obtenidos ($d_{maxx} = 11,29$, $d_{medx} = 2,55$, $d_{maxy} = 8,71$, $d_{medy} = 5,98$) no invitaron a continuar por esta vía.

3.6.4. Modelos No Lineales

En vista de los malos resultados obtenidos hasta aquí, se decidió probar la opción de identificación de modelos no lineales disponible en Matlab©. En este caso en seguida se vio que se obtenían resultados mucho mejores, así que se decidió continuar la fase de identificación del modelo por esta vía.

Igual que en los otros casos se han ido probando distintas alternativas en:

1. Valores de saturación: desde 0,4 hasta ningún límite.

2. Variables de entrada: Se han probado modelos monovariantes y bivariantes, tanto para la salida de v_x como para la salida de v_y .
3. Filtrado de datos: se han estudiado modelos con filtrado de datos de 1 rad/s, 2 rad/s, 3 rad/s, 5 rad/s, 10 rad/s, e, incluso, con los datos sin filtrar.
4. Función de entrada y salida. Se han probado las diferentes opciones de tipos de funciones de entrada y salida probando todas las combinaciones y seleccionando aquellas que han dado mejores resultados.

Y todo esto tanto para v_x como para v_y .

Tras numerosas pruebas se han encontrados modelos no lineales tanto para v_x como para v_y que ofrecen los mejores resultados de todos los analizados. Dichos resultados se presentan en la Tabla 3.4. Como se ve, al trabajar con modelos no lineales no es preciso establecer valores de saturación para las variables de entrada. Esta cuestión está bien resuelta por el modelo, así que no se aplica. Los resultados numéricos obtenidos en ambos casos son similares, tanto para la distancia máxima como para la distancia media.

En la Figura 3.12 se presentan los errores de las dos respuestas frente a los datos experimentales. Aquí podemos ver que el error máximo está relativamente equilibrado, en el sentido de que no se produce en un punto aislado, sino que después del valor máximo hay algunos otros puntos con errores similares. Se deduce que el modelo no falla especialmente en una zona concreta, sino que responde de forma más uniforme.

En la Figura 3.13 podemos ver la respuesta de las variables x y v_x frente a los datos experimentales. La respuesta de la velocidad es cualitativamente buena, con algunos errores apreciables en el tramos de consigna constante igual a 0,6. La respuesta del desplazamiento presenta errores más grandes. Esto es debido a que al ser una integración pura de la velocidad, los errores se van acumulando, siendo apreciables, especialmente en las zonas de consigna constante. También se detecta la posible existencia de una posible deriva, aunque no se ha querido corregir para no desviar el modelo.

Finalmente, en la Figura 3.14 se presenta la respuesta de las variables y y v_y comparadas con las respectivas salidas del experimento. En el caso de la velocidad se aprecian los errores del modelo para valores de consigna de 0,5, 0,6, y 0,7. Como antes, la respuesta del desplazamiento es peor, con errores mayores, también por el mismo motivo (se trata de una integración pura y acumula los errores). Además, en este caso, se aprecia la presencia de una interacción entre las dos variables de entrada que en el modelo no está recogido. Se ha probado también el modelo con dos entradas, pero presentaba desviaciones mayores que este, así que se descartó. Por último, el fenómeno de deriva parece algo más apreciable en este modelo, aunque

Var. dep.	Var. indep.	Frec. Filtrado	Saturación	d_{max}	d_{med}
vx	Ref_Pitch y Ref_Roll	$\omega > 3$ rad/s	1 - 1	2.545	0.496
vy	Ref_Roll	$\omega > 10$ rad/s	1	2.586	0.494

Tabla 3.4: Resultados del modelo no lineal para vx y vy

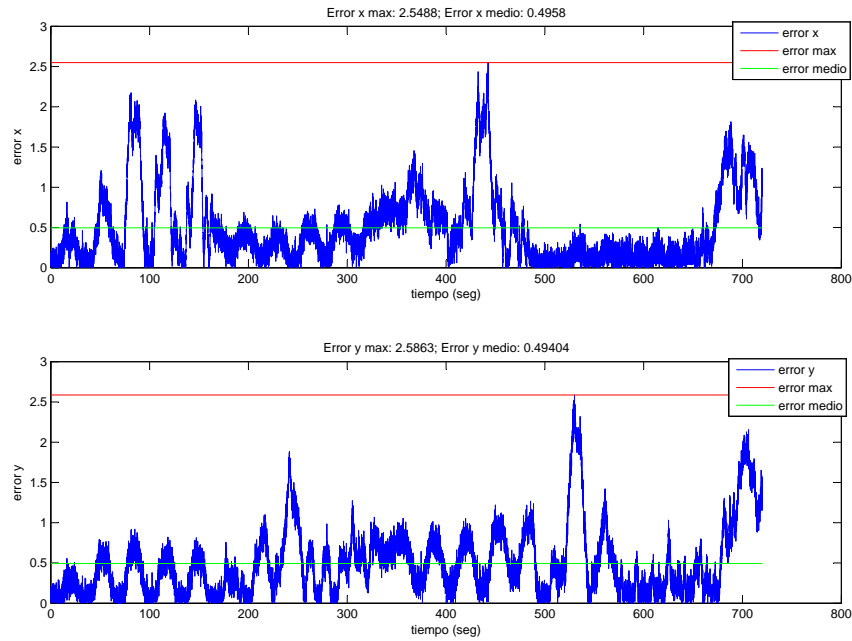


Figura 3.12: Errores del modelo frente a los datos experimentales

con en el otro modelo, y por los mismos motivos (no desvirtuarlo) tampoco se ha corregido.

3.6.5. Conclusiones y selección del modelo

Si bien el objetivo inicial del presente proyecto era desarrollar un modelo mediante ANFIS para el sistema propuesto, finalmente, y teniendo en cuenta que el objetivo final de el trabajo es participar en un concurso, se ha decidido seleccionar el modelo que mejores resultados daba. De todas formas el estudio del sistema bajo ANFIS y el modelo en sí se ha obtenido, así que se puede considerar que el objetivo inicial se ha cumplido sólo que en aras de la mejor clasificación posible en el concurso se ha optado por otra alternativa mejor.

En conclusión, se ha seleccionado el modelo no lineal para la representación del vehículo y diseñar el controlador de seguimiento de trayectorias.

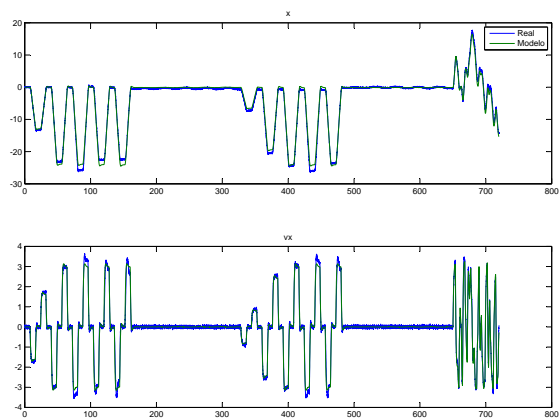


Figura 3.13: Comparativa del modelo no lineal de vx y los resultados experimentales

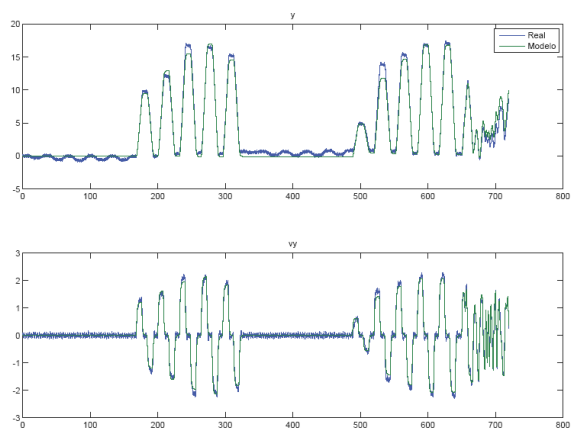


Figura 3.14: Comparativa del modelo no lineal de vy y los resultados experimentales

Capítulo 4

Controladores

4.1. Especificaciones de control

La estrategia de control que se desarrolle debe intentar satisfacer varias condiciones:

1. Debe ser paramétrica. Según se ha visto, se desarrollará el control a partir de un modelo identificado a partir de unos datos. Si se logra pasar a la segunda fase se podrá trabajar con el modelo de la organización. Y si finalmente se accede a la fase final se trabajará directamente sobre el vehículo. Así que el control deberá actuar sobre dos modelos distintos y sobre el vehículo real. Así pues, el hecho de que sea paramétrico parece muy conveniente.
2. Debe optimizar la velocidad del vehículo, en el sentido que hay que recorrer el espacio previsto en el menor tiempo posible.
3. Debe seguir la trayectoria con la mayor precisión posible, alejándose lo menos posible de la línea recta que une dos puntos sucesivos de la trayectoria prevista.

Se trata, pues, de encontrar una solución de compromiso entre la velocidad del desplazamiento y la precisión en la trayectoria. Es de esperar que circular a una mayor velocidad aumente la imprecisión en la trayectoria, ya que las mismas perturbaciones producirán un efecto mayor sobre el desplazamiento del cuatrirrotor.

La relación entre las distintas magnitudes que sirven para evaluar el control se realizarán por medio del script proporcionado por la organización del Benchmark. Recordemos que los criterios son:

1. Distancia media (en valor absoluto) a la trayectoria ideal.
2. Distancia máxima (en valor absoluto) a la trayectoria ideal.
3. Tiempo de recorrido.

Dicho script ofrece una valoración global, denominada GPP, que combina estos parámetros [3]. La minimización de este valor GPP se ha tomado como criterio de elección para escoger entre los controladores probados.

4.2. Variables de control

De lo anterior se concluye que hay que diseñar un controlador, a poder ser parametrizable, que controle dos factores:

1. La velocidad del vehículo.
2. La dirección del vehículo.

Esto permite descomponer el problema de control en dos problemas menores: establecer la velocidad del vehículo y determinar la dirección adecuada en cada momento. A continuación vamos a tratar cada uno de estos problemas por separado.

4.3. Dirección del movimiento

La determinación de la dirección del vehículo para llevarlo del punto actual al siguiente punto de la trayectoria es un sencillo problema de trigonometría. Se trata de calcular el ángulo α que marca la dirección que hay que seguir (ver Figura 4.1). A partir de ahí, la velocidad se debe descomponer en sus componentes horizontal y vertical:

$$v_x = v \cos \alpha, \quad (4.1)$$

$$v_y = v \sin \alpha. \quad (4.2)$$

La determinación del ángulo α también es muy fácil con la información disponible, simplemente tenemos en cuenta que es

$$\tan \alpha = \frac{error_y}{error_x}. \quad (4.3)$$

4.4. Velocidad de desplazamiento

En principio la velocidad debería ser la máxima posible para llegar al siguiente punto de la trayectoria lo antes posible. Esto sería perfecto si sólo hubiera que hacer un tramo recto. Pero como hay que hacer varios, al llegar al primero a máxima velocidad nos alejaremos de él mucho antes de poder corregir la dirección, cometiendo aquí un gran error en la trayectoria. Esto nos lleva a considerar la distancia al

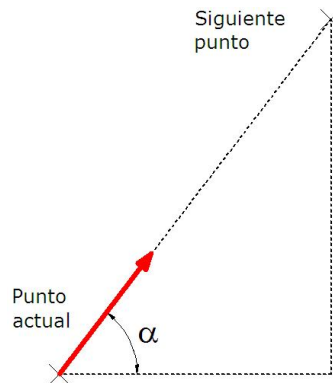


Figura 4.1: Control de la dirección del movimiento

siguiete punto de la trayectoria. El nuevo criterio podría ser ir a *máxima* velocidad si estamos *lejos* del siguiete punto y *lento* si estamos *cerca*. Este criterio necesita evaluar numéricamente el significado de *cerca* y *lejos*, así como de *lento*. Esto encaja perfectamente en la filosofía y aplicación del control *fuzzy*. Y esta ha sido la idea con la que se ha trabajado para desarrollar el controlador. Tras trabajar con ello empíricamente se ha visto que es mejor tener tres tramos de distancia y velocidad.

Los valores de partida para *lejos* se han tomado teniendo en cuenta la máxima velocidad alcanzable (3,7 m/s) y que en algunas estimaciones se ha obtenido la presencia de un retraso de unas 3 muestras (0,18 s), y hay que tener en cuenta que en este tiempo se recorren más de 67 cm a máxima velocidad. Se ha considerado que un valor razonable para definir *lejos* en nuestro caso es una distancia mayor que 4 m. El segundo tramo de distancia está establecido entre 1 y 4 m. *Cerca* son las distancias menores que 1 m.

4.4.1. Consideraciones sobre la velocidad máxima

Como se ha comentado anteriormente, se da la circunstancia de que las velocidades máximas en los distintos ejes son diferentes. Eso significa que la velocidad máxima alcanzable varía según la dirección que se sigue. Como se vio, según el eje x será de 3 m/s, según el eje y de 2,15 m/s, y la máxima posible será de unos 3,7 m/s si se sigue una trayectoria formando un ángulo de unos $35,5^\circ$ con el eje x . Eso significa que las trayectorias según el eje y serán siempre más lentas que las que sean sobre el eje x , y éstas más lentas que las que sigan una dirección con el ángulo indicado. Esto establece límites absolutos a los tiempos mínimos del recorrido, haciendo que la valoración obtenida con el script de la organización no sea directamente comparable para trayectorias diferentes, ya que la velocidad tomada como límite en todos los casos es de 3 m/s. Por eso las comparaciones entre diferentes controladores se ha hecho siempre con el mismo recorrido, para no desvirtuar los valoraciones obtenidas

y poder comparar directamente.

4.5. Controladores diseñados

4.5.1. Control fuzzy

La primera tentativa de control se ha basado en la estructura borrosa basada en las siguientes reglas:

1. Si la distancia al siguiente punto es *grande*, la velocidad debe ser *grande*.
2. Si la distancia al siguiente punto es *media*, la velocidad debe ser *media*.
3. Si la distancia al siguiente punto es *pequeña*, la velocidad debe ser *pequeña*.

Partiendo de esta estructura se han diseñado diferentes controladores que, a partir de la distancia al siguiente punto, establecen una consigna para la velocidad entre 0 y 1, siendo valor 0 para velocidad nula, y 1 para la velocidad máxima. Con este planteamiento aparece el problema referente a las diferentes velocidades según los ejes x-y. Como se ha dicho, la velocidad máxima según el eje x es mayor. Esto hace que cuando hay que ir a alta velocidad y se sigue un movimiento oblicuo, se recorra más rápidamente la distancia en x que la distancia en y. Este efecto se ve claramente en la Figura 4.2. En esta figura el punto verde es el punto final de la trayectoria establecida (recordemos que es paramétrica y se puede ajustar). Los distintos puntos rojos son los puntos de paso. Además, el círculo coloreado en rojo corresponde a la zona que se considera válida, es decir, una vez alcanzada la zona coloreada en rojo se considera que se ha alcanzado el punto deseado. Dicho círculo tiene un radio de 0,2 m, tal como especifican las normas del concurso. Los distintos segmentos rectos en rojo representan la trayectoria ideal: aquella que une dos puntos consecutivos en línea recta, minimizando la distancia entre ellos y, por tanto, el tiempo de vuelo. Finalmente, las líneas azules indican la trayectoria del vehículo con el modelo de trabajo y el control diseñado. En esta figura se ve que con nuestro controlador se recorre oblicuamente un tramo hasta situarse aproximadamente en la línea vertical del siguiente punto, a partir del cual el movimiento es básicamente vertical.

Este efecto nocivo se puede reducir teniendo en cuenta la relación que hay entre las velocidades máximas:

$$\frac{\max(v_x)}{\max(v_y)} = \frac{3}{2,15} \approx 1,4 \quad (4.4)$$

Así, podemos reducir la consigna de la velocidad x para que no supere a la y. Esto hace que el desempeño del controlador mejore, llegando al que se puede observar en la Figura 4.3. En este caso las trayectorias seguidas son más cercanas a las trayectorias ideales, aunque todavía se puede apreciar que existe posibilidad de ajustar algo

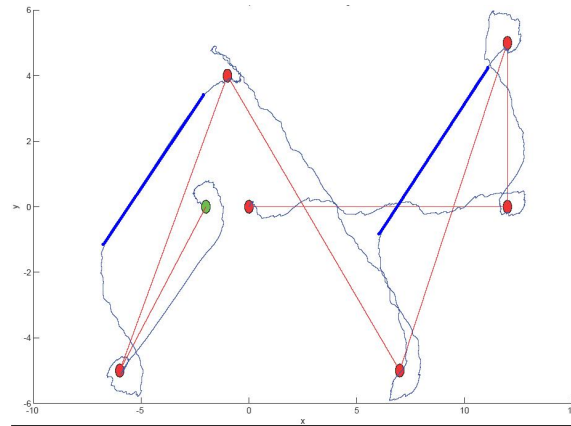


Figura 4.2: Desviación de la línea recta en trayectorias oblicuas

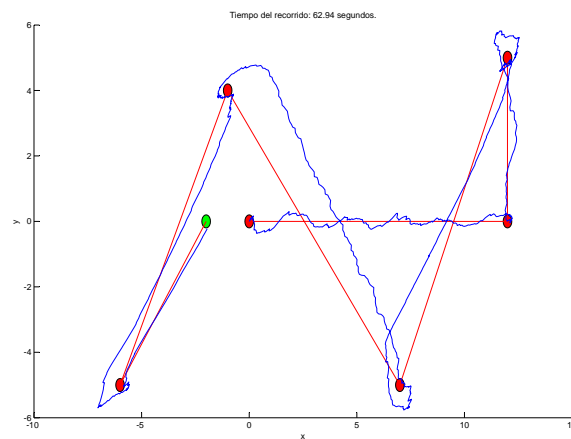


Figura 4.3: Trayectoria seguida con el control fuzzy

más las líneas oblicuas que genera el controlador para acercarlas a las ideales. Este trabajo de ajuste no se ha hecho porque a partir de aquí, y con esta información, se ha seguido una vía diferente. Los resultados para este controlador son los que se pueden ver en la Tabla 4.1. En cualquier caso se ha visto claramente que el control de las diferentes velocidades en cada eje es muy importante, tanto para que la trayectoria se ajuste a la ideal como para optimizar la velocidad del vehículo.

4.5.2. Control de tipo lineal

Como se ha visto, el control de las velocidades es muy importante, así que se ha procedido a estudiar su perfil. En los datos del primer ensayo, y en los del segundo, hay suficiente información como para obtener las relaciones aproximadas entre las señales de control y las velocidades según cada eje, tal y como se puede observar en la Figura 4.4. Así, se tiene que cada una de las velocidades tiene tres tramos.

Tabla 4.1: Resultados del controlador fuzzy

d_{med} (m)	0.342
d_{max} (m)	1.821
t_{rec} (s)	62.94
GPP	163

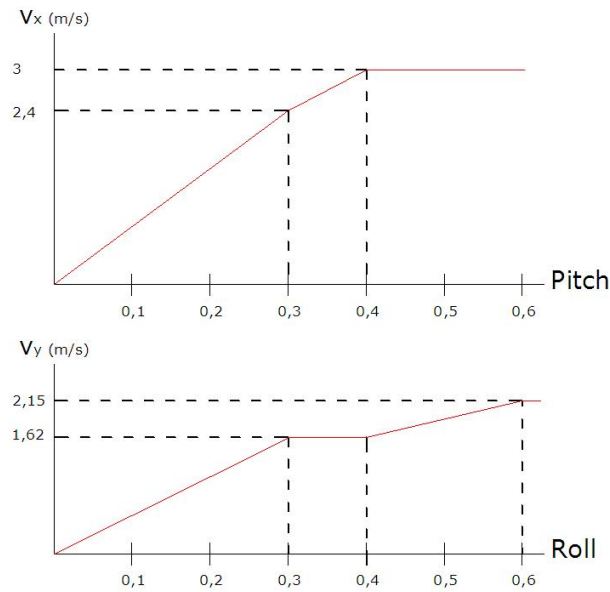


Figura 4.4: Curvas de relación de las velocidades con las consignas

Para la velocidad según el eje x se puede considerar que las velocidades son iguales a la máxima siempre que el valor de la consigna supere 0,4. De 0 a 0,4 se han establecido dos tramos rectos de pendientes algo diferentes, ya que con un solo tramo no se obtenían resultados que se ajusten bien a los datos del experimento.

Para la velocidad según el eje y se puede considerar que las velocidades son iguales a la máxima siempre que el valor de la consigna supere 0,6. Además, para valores de la consigna entre 0,3 y 0,4 se puede considerar que la velocidad obtenida es la misma. Finalmente, entre 0 y 0,3, y entre 0,4 y 0,6 se establecen dos tramos rectos que den continuidad al perfil.

Además, tenemos que las velocidades alcanzables funcionan de forma sencilla mientras $v_y < 2,15$ m/s. En el momento que sea precisa una velocidad superior a esta según el eje y tendremos que hacer ajustes para reducir v_x , ya que v_y no puede aumentar más. En este punto, debido a los plazos de entrega, se decidió tratar este problema de forma diferente. Resulta más sencillo trabajar con tres velocidades

prefijadas de antemano que con una variación continua (de tipo *fuzzy*) sobre la velocidad el vehículo. En cualquier caso, se ha trabajado ajustándose al esquema anterior:

1. Si la distancia al siguiente punto es $d > d_{max}$, la velocidad debe ser v_{max} .
2. Si la distancia al siguiente punto es $d_{min} < d < d_{max}$, la velocidad debe ser v_{med} .
3. Si la distancia al siguiente punto es $d < d_{min}$, la velocidad debe ser v_{min} .

En este caso es preciso fijar 4 parámetros. Como valores preliminares se tomaron los de la Tabla 4.2. Posteriormente se han ido ajustando por el proceso de prueba y error, a partir del modelo disponible, y con ayuda del script suministrado por la organización que permitía compararlos numéricamente.

Tabla 4.2: Valores iniciales y finales del control de tipo lineal

Parámetro	Valor inicial	Valor ajustado
d_{min} (m)	1	1
d_{max} (m)	4	4
v_{min} (m/s)	0.5	0.4
v_{med} (m/s)	1.75	0.92

Con todas estas consideraciones obtenemos las expresiones que nos dan las consignas para las variables manipuladas Ref_pitch y Ref_roll .

Distancia pequeña

Para distancias cercanas ($d < 1$ m) la velocidad, v , se ha fijado en 0,4 m/s y se obtiene con las consignas:

$$Ref_pitch = \frac{v}{A} \cos \alpha, \quad (4.5)$$

$$Ref_roll = \frac{v}{B} \sin \alpha. \quad (4.6)$$

Distancia media

Para distancias intermedias ($1 \leq d < 4$) la velocidad, v , se ha fijado en 0,92 m/s y se alcanza con consignas del tipo:

$$Ref_pitch = \frac{v}{C} \cos \alpha, \quad (4.7)$$

$$Ref_roll = (D \cdot v - E) \sin \alpha. \quad (4.8)$$

Es interesante resaltar que, en este caso, siendo la velocidad de 0.92 m/s, el tramo de trabajo de Ref_Roll (ver Figura 4.4) es el primero, de manera que el valor de E en este caso resulta ser 0. El parámetro E aparecía porque inicialmente se tomó como velocidad media el valor 1.75 m/s, que caía dentro del tercer tramo de la curva de Ref_Roll.

Distancia grande

Finalmente, cuando la distancia es grande ($d \geq 4$) tenemos que la velocidad tiene que ser máxima. Eso divide el plano en 4 regiones. Limitándonos para la explicación, sin pérdida de generalidad, al primer cuadrante, resulta que si el ángulo del movimiento es superior el límite indicado anteriormente de $35,5^\circ$ (o equivalentemente $\tan \alpha > 0,71$) v_y puede ser máxima mientras que v_x tendrá que ajustarse para respetar la dirección del movimiento. Como el perfil de velocidad de v_x visto en la Figura 4.4 tiene tres tramos, esta región queda a su vez subdividida en dos tramos, cuyo límite viene establecido por $\tan \alpha = 0,89$. Así tenemos que para $0,71 < \tan \alpha < 0,89$ las consignas son de la forma:

$$Ref_pitch = \frac{F}{\tan \alpha} + G, \quad (4.9)$$

$$Ref_roll = 0,6 \quad (4.10)$$

y para $\tan \alpha \geq 0,89$ son:

$$Ref_pitch = \frac{H}{\tan \alpha}, \quad (4.11)$$

$$Ref_roll = 0,6 \quad (4.12)$$

Análogamente, cuando $\tan \alpha < 0,71$ la velocidad que hay que limitar es v_y , siendo v_x máxima. También tenemos dos tramos para v_y , tal como se ve en la Figura 4.4. Se llega, igualmente a que si $\tan \alpha \leq 0,54$ las ecuaciones son de la forma:

$$Ref_pitch = 0,4 \quad (4.13)$$

$$Ref_roll = I \tan \alpha, \quad (4.14)$$

y para $0,54 < \tan \alpha < 0,71$ son:

$$Ref_pitch = 0,4 \quad (4.15)$$

$$Ref_roll = J \tan \alpha - K. \quad (4.16)$$

4.6. Resultados obtenidos y conclusiones

Los valores concretos según las consideraciones anteriores para los parámetros de todas estas expresiones eran los que se ven en la segunda columna de la Tabla 4.3. De todas formas, se han ajustado empíricamente para intentar optimizar los resultados del control, por medio de la herramienta de valoración disponible, obteniendo los valores de la tercera columna del mismo cuadro para los parámetros. Recordemos que la herramienta de valoración nos permitía definir rutas por medio de los puntos a seguir en la trayectoria deseada. Esto nos ha permitido establecer rutas que queden dentro de cada uno de los rangos angulares deseados y así poder valorar los parámetros correspondientes. En general los ajustes han sido pequeños, así que a priori parece que el criterio utilizado para su obtención teórica no estaba desencaminado.

Podemos ver los resultados de ambos controladores en la Tabla 4.4. Como se ve se ha sacrificado el tiempo del recorrido (incremento del 5%) para mejorar sensiblemente las distancias medias y máxima (un 55% y 48%, respectivamente). En este caso el control funciona mucho mejor. Como se puede ver en la Figura 4.5 las diferentes trayectorias de cada tramo son ahora básicamente paralelas a las ideales. Aún así, existen problemas en la llegada a algún punto de paso. Es posible que este defecto pudiera subsanarse o mejorarse introduciendo puntos de paso intermedios entre cada dos puntos de la trayectoria preestablecida. Aunque se ha considerado no se ha implementado por falta de tiempo.

Por último, se presentan las consignas generadas (ver Figura 4.6) por el controlador. En este gráfico se presentan los valores a que se ve sometido el vehículo (o su modelo) para llevarlo de un punto de la trayectoria al siguiente. Recordemos que en la fase de identificación se supuso que se trabajaría con consignas de tipo escalonado, ya que al relizar trayectorias rectas se esperaba dicho comportamiento. Esta gráfica nos permite validar nuestra hipótesis.

Tabla 4.3: Valores de los parámetros del control de velocidad

Parámetros	Valor teórico	Valor ajustado
A	8	7.75
B	5.4	5.4
C	8	7.75
D	0.17	0.16
E	0	0
F	0.214	0.169
G	0.06	0.05
H	0.2675	0.22
I	0.555	0.6
J	1.154	1.35
K	0.223	0.2

Tabla 4.4: Comparativa de los controladores lineales

CONTROLADOR	Teórico	Ajustado
d_{med} (m)	0.296	0.133
d_{max} (m)	0.916	0.475
t_{rec} (s)	37.58	39.42
GPP	22.6	21.4

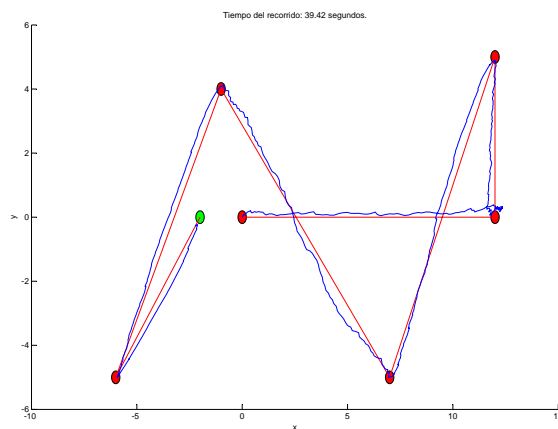


Figura 4.5: Trayectoria seguida con el control lineal definitivo

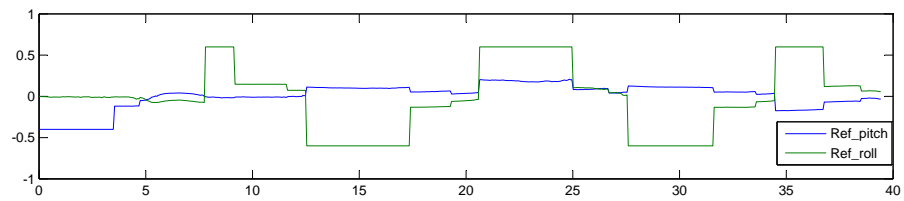


Figura 4.6: Consignas generadas por el controlador

Capítulo 5

Conclusiones

El presente Proyecto de Fin de Master ha permitido alcanzar los objetivos propuestos, que eran, principalmente, aplicar los conocimientos adquiridos en la asignatura de Control Inteligente. En este sentido se han realizado las siguientes tareas:

1. Identificar un modelo del vehículo por medio de la técnica ANFIS.
2. Implementar un controlador para el seguimiento de trayectorias, con el modelo identificado, por medio de la lógica difusa.

Para poder realizar dichas tareas ha sido necesario trabajar en las siguientes áreas:

1. Análisis de la dinámica de los cuatrirrotores.
 - En primer lugar se ha analizado la representación, la cinemática, y la dinámica de los vehículos aéreos no tripulados (UAV - Unmanned Aerial Vehicles).
 - Posteriormente se ha concretado en la descripción de los cuatrirrotores, con su especial sistema de guiado.
 - Finalmente, se ha analizado en detalle el Ar.Drone partiendo de la información técnica disponible, así como por los datos disponibles de los experimentos suministrados por la organización del concurso.
2. Se ha profundizado en el uso y las capacidades de diferentes herramientas de identificación disponibles en Matlab©. En especial con los Toolbox *ident* y *anfisedit*. El primero se ha utilizado para la identificación de modelos lineales (de primer y segundo orden) y no lineales. El segundo para identificación por medio de la técnica ANFIS.

3. Se ha trabajado en el diseño de un controlador para el seguimiento de trayectorias por medio del control borroso, utilizando para ello el Toolbox *fuzzy* de Matlab©. Con él se ha trabajado en estructuras de tipo Takagi-Sugeno basado en reglas borrosas.

De forma paralela, el estar participando en un concurso y el disponer de herramientas de valoración cuantitativa tanto del modelo identificado como del controlador diseñado nos ha permitido profundizar más en ambas facetas, yendo más allá de lo inicialmente previsto en aras de mejorar los resultados. Esta ha sido la causa de acabar trabajando con modelos no lineales diferentes a ANFIS y el desarrollo de un controlador por tramos de velocidad constante. En cualquier caso este hecho nos ha permitido mejorar sensiblemente los resultados en ambos casos. Por último, existía la posibilidad, al final no implementado, de incluir puntos de seguimiento de la trayectoria que podrían haber ayudado a mejorar los resultados de control.

En conclusión, se ha profundizado en los puntos planteados y se han tratado otros inicialmente no previstos pero que han dado mayor alcance al trabajo.

5.1. Resultados de la primera fase del Benchmark 2011-12

Los resultados publicados de la primera fase correspondientes a los seis mejores equipos se muestran en la Tabla 5.1. En ella aparece en sexto lugar el equipo ISC-Master 1, representando a la Universidad Complutense de Madrid, que se corresponde con el trabajo que se expone aquí. De dichos resultados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Tabla 5.1: Resultados de la primera fase del Benchmark 2011-2012 del CEA

EQUIPO	GPP Modelado	GPP Control	GPP Global
ETSII-UPM	5.63	17.33	4.27
Computer Vision Group-UPM	41.44	6.51	20.62
Dept.Telecom. e Ing. Sistemas - UAB	42.73	21.42	24.61
IMPULSA	125.08	49.11	139.61
VIGO-1	216.34	61.95	325.34
ISC-Master 1	469.73	33.05	686.88

1. El modelo identificado no era cuantitativamente bueno. Ya se preveía con los resultados obtenidos antes del concurso, pero aquí se ha confirmado.

2. El modelo era cualitativamente bueno y, basado en él, ha sido posible realizar un control razonablemente bueno.

5.2. Trabajos futuros

Como trabajo futuro inmediato está la segunda fase del concurso, consistente en:

1. Implementar el controlador en el software de la plataforma de implementación que se utilizará en la fase final del concurso.
2. Definir el protocolo de ensayos para ajustar el controlador con el vehículo real.
3. Implementar y validar el controlador en la plataforma de desarrollo.

Como se ha visto el modelo identificado era malo, pero el hecho de que el controlador esté compuesto de parámetros debería facilitar la mejora del control una vez se disponga del modelo que suministrará la organización. De todas formas el modelo seguirá siendo diferente del vehículo real, así que el ajuste de los parámetros deberá repetirse en la fase final con el vehículo cuatrirrotor.

Bibliografía

- [1] A. Béjar, M. Ollero. Modelado y control de helicópteros autónomos. revisión del estado de la técnica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, (4):5–16, 2008.
- [2] S. Reynoso-Meza G. Blasco, F.X. García-Nieto. *Concurso en Ingeniería de Control 2012*.
- [3] S. Reynoso-Meza G. Blasco, F.X. García-Nieto. Control autónomo del seguimiento de trayectorias de un vehículo cuatrirrotor. simulación y evaluación de propuestas.
- [4] R. Bouabdallah, A.N. Siegwart. *Dynamic Modeling of UAVs*. PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006.
- [5] P. Lozano R. Albertos P. Castillo, P. García. Modelado y estabilización de un helicóptero con cuatro rotores. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, (1):41–57, 2007.
- [6] M. De Lellis Costa. *Modeling, Identification and Control of a Quadrotor Aircraft*. PhD thesis, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical Univ. in Prague, 2011.
- [7] V. Fiser D. Faigl J. Karjník, T. Vonásek. Ar-drone as a platform for robotic research and education. *Research and Education in Robotics*, 2011.
- [8] A. Álvarez Delgado. *Control fuzzy logic para un sistema cuatrirrotor*. Univ. Complutense de Madrid.
- [9] M.V. Peña Giraldo. *Modelamiento, simulación y hallazgo de modelos linealizados a partir de técnicas de identificación de un cuatrirrotor*. PhD thesis, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Univ. Nacional de Colombia, 2009.
- [10] A Redolfi, J.A. Henze. *Quadricóptero Autónomo de Arquitectura Abierta, QA3*. Univ. Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba.

- [11] V. Morata F. Santos, M. López. *Intelligent Fuzzy Controller of a Quadroter*. Univ. Complutense, 2010.
- [12] www.ardrone.parrot.com. Parrot.