

Laboratorio: Análisis de control de altura del dron Crazyflie 2.1

Objetivos

- Comprender el comportamiento dinámico del dron Crazyflie al emplear un controlador PID en la altura de vuelo.
- Observar el efecto de los parámetros K_P , K_I y K_D en la respuesta del sistema, tanto en simulaciones como en experimentos físicos.
- Comparar los resultados entre un modelo simplificado en distintas condiciones y el comportamiento real del dron, identificando diferencias y limitaciones del modelo.
- Desarrollar habilidades de implementación y ajuste de controladores PID en entornos de simulación en Matlab y experimentaciones prácticas.

Este laboratorio se desarrollará en una sesión.



Figura 1. Dron Crazyflie 2.1 ensamblado.

Material y equipo

A continuación, se enlistan los materiales y el equipo necesario para desarrollar este laboratorio:

- Dron Crazyflie 2.1 con placa Flow Deck integrada
- Dispositivo Crazyradio PA
- Ordenador con Windows 10/11 con Matlab y Python instalados
- Paquete/carpeta de herramientas de software descargado
- Sistema de Captura de Movimiento del ecosistema Robotat del laboratorio CIT-116

Prelaboratorio: Manual de usuario de dron Crazyflie

Previo a asistir a la sesión de laboratorio designada, deberá leer el [manual de usuario del Crazyflie 2.1](#). Debe procurar que entienda el funcionamiento básico del dron e instalar en su ordenador todas las dependencias de *software* presentadas. Esto se debe a que el tiempo de laboratorio está dado exclusivamente para realizar experimentos con el controlador de posición del dron.

Primera parte: Simulación del modelo simplificado en condiciones ideales

En esta sección, deberá realizar una simulación en Matlab del comportamiento del modelo simplificado de un dron, controlado por un controlador PID en condiciones ideales. Deberá seguir los pasos presentados a continuación para lograr la simulación, obtener respuestas para distintas versiones del controlador y, con base en estas, responder un conjunto de preguntas.

Modelo simplificado del dron

Se considerará un modelo simplificado que describe la dinámica vertical de vuelo del dron. Asumimos una dinámica de segundo orden con la siguiente ecuación:

$$m \cdot \ddot{h} = u - mg$$

Donde

- h es la altura del dron
- u es la entrada de control (fuerza generada por los motores)
- g es la gravedad
- m es la masa del dron

Implementaremos un controlador PID para calcular el valor de entrada de control en función del error de altura.

$$u = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

Donde K_P , K_I y K_D son las ganancias del controlador.

Instrucciones

- Definición de parámetros:** Defina variables para almacenar los valores de los parámetros de la simulación correspondientes a todas las cantidades involucradas, como las características del sistema o los parámetros del controlador.

Parámetros mínimos para incluir:

- Parámetros del sistema
 - Masa del dron
 - Gravedad
- Parámetros del controlador PID
 - K_P : Ganancia proporcional
 - K_I : Ganancia integral
 - K_D : Ganancia derivativa
 - Variables para almacenar el error
- Otros parámetros de simulación
 - Altura objetivo
 - Tiempo de simulación
 - Variables de estado inicial
 - Vectores para almacenar resultados

2. **Bucle de simulación:** Establezca una estructura cíclica como bucle de simulación, en ella actualizará la altura del dron en cada paso del tiempo, realizará el cálculo del error, la actualización del controlador PID y la simulación de la dinámica del dron.

- En cada paso de tiempo, calcule el error de altura, así como los términos de control integral y derivativo.
- Con los parámetros K_P , K_I y K_D , implementa la ecuación del controlador PID para la entrada del sistema.
- Calcula la aceleración, velocidad, y altura del dron en función del control y las condiciones ideales (sin resistencias adicionales).
 - Recuerde que con la ecuación del modelo puede determinar la aceleración de cada iteración y con esta y el diferencial de tiempo, puede determinar velocidad y altura.
- Guarda los valores obtenidos de altura, velocidad, señal de control, y error en los vectores definidos.

3. **Gráficas:** Genera una figura con tres gráficos: altura, error, y señal de control a lo largo del tiempo. Observa la estabilidad de la altura deseada y la respuesta de control.

4. Simulación variando las ganancias del controlador PID

Al llegar a este punto ya debe tener un algoritmo completo y funcional de simulación del modelo simplificado del dron (**pregunte a su catedrático de laboratorio para confirmar que sea así**).

Utilice su algoritmo de simulación para obtener las **tres gráficas de resultantes para cada combinación de ganancias del controlador PID** que se presentan en la siguiente tabla:

Prueba	K_P	K_I	K_D
1	2.50	0.00	0.00
2	2.50	1.00	0.05
3	4.50	2.00	0.05
4	6.00	2.50	0.05

Cuadro 1. Combinaciones de ganancias PID para los experimentos.

Luego de obtener las gráficas para cada combinación de ganancias, analice todos los resultados y responda:

- **¿Cómo afectan los parámetros K_P , K_I y K_D a la respuesta del sistema? Comente sobre la velocidad de respuesta, sobreimpulso y estabilidad.**
- **¿Qué parámetros del controlador producen una respuesta más suave y cuál tiende a generar oscilaciones?**
- **¿Cómo influye la integral del error en el comportamiento del dron durante el despegue?**

Segunda parte: Simulación de modelo simplificado en condiciones no ideales

En esta sección, nuevamente realizará una simulación del modelo simplificado del dron con la diferencia de que lo hará para un entorno con condiciones no ideales (más realistas). Esta sección extiende el modelo anterior para incluir condiciones de no idealidad (resistencia al aire y retardo en motores).

Instrucciones

1. Definición de parámetros de no idealidad:

- Cree una copia de su algoritmo anterior y agregue los efectos de resistencia al aire (coeficiente c_{drag}) y retardo en la dinámica de los motores (τ) a su modelo.
 - Recuerde crear las variables necesarias para incluir dichos efectos.
 - Resistencia al aire
 - Coeficiente c_{drag} : utilice un valor de 0.15.
 - Retardo en la dinámica de los motores
 - Constante de tiempo de dinámica τ : utilice un valor de 0.1.
 - Defina los límites para la señal de control
 - Límite máximo: $2.5 \cdot \text{masa} \cdot \text{gravedad}$.
 - Límite inferior: 0.

2. Bucle de simulación:

- Adicional al cálculo de la señal de control, incluya la ecuación de la dinámica de los motores y saturación de la señal:

$$u = u_{prev} + \frac{(u_{controlador} - u_{prev}) * dt}{\tau}$$

- Luego utiliza las funciones de MATLAB ***max*** y ***min*** para limitar la señal de control, lo que figuraría la saturación de los motores.
- Modifica el cálculo de la aceleración incluyendo resistencia al aire:

$$a = \frac{u - mg - c_{drag}v}{m}$$

- Donde
 - a es la aceleración del dron
 - v es la velocidad del dron
 - u es la entrada de control (fuerza generada por los motores)
 - g es la gravedad
 - m es la masa del dron
 - c_{drag} es el coeficiente de resistencia de aire

3. Gráficas: Grafica nuevamente altura, error, y señal de control.

Nuevamente realice la simulación con el listado de combinaciones de parámetros PID de la parte anterior y genere las **gráficas por cada combinación** y compare los resultados respondiendo las preguntas:

- ¿Cómo afectan la resistencia del aire y la dinámica de los motores al desempeño del dron?
- ¿Qué diferencia observas al comparar las condiciones ideales con las no ideales?

Tercera parte: Experimentación física con el dron

En esta sección,

Instrucciones

1. Organización de archivos y herramientas de software

Revise la organización de sus archivos y verifique que pueda ejecutar todas las funciones, tanto del Robotat como de Crazyflie. Estos archivos se encuentran en carpetas propias, por ello, en Matlab se utiliza el comando *addpath* para añadir las carpetas al entorno de Matlab.

2. Conectar con el Sistema Robotat:

Inicializa la conexión con Robotat y configura el identificador del marcador del dron.

3. Configuración del Timer para capturar los datos con Robotat

Esta sección se le otorgará para que únicamente tenga que ejecutarla, aún así no está de más que analice el código. Esta sección genera variables para utilizar una función *Timer Callback* que se utilizará para capturar la posición del dron durante los experimentos.

4. Configuración del controlador PID:

Define las ganancias PID del controlador en el dron.

- K_p : Ganancia proporcional, utilice un valor inicial de 2.50
- K_i : Ganancia proporcional, utilice un valor inicial de 0.50
- K_d : Ganancia proporcional, utilice un valor inicial de 0.00

Prueba	K_p	K_i	K_d
1	2.50	1.00	0.01
2	4.50	2.00	0.01
3	6.00	2.50	0.01

Cuadro 2. Combinación de ganancias para experimentos físicos con dron Crazyflie.

5. Secuencia de Vuelo y Captura de Datos

En esta sección deberá realizar los experimentos de vuelo con modificación en el controlador PID del eje Z del dron Crazyflie. Para ello solo debe seguir las indicaciones a continuación:

- Coloque el dron Crazyflie sobre la plataforma del ecosistema Robotat en el punto indicado por el catedrático.
- Encienda al dron y conecte el dispositivo Crazyradio.
- Ejecute la secuencia del experimento dada (no modifique ninguna parte de este algoritmo).
- Ejecute la última sección para obtener las **gráficas de los resultados de posición capturados con el sistema de captura de movimiento del Robotat**.

Evaluación:

A más tardar una semana después de la sesión (el día de inicio del próximo laboratorio), deberán subir un reporte a Canvas (**archivo.pdf; uno por pareja de laboratorio**)

El reporte deberá incluir:

- 1) **Identificación:** sus nombres, carnés, nombre del curso, sección de laboratorio (11, 12, 21 o 22), número y título del laboratorio, fecha.
- 2) Una sección de **Resultados**, en la que incluyan todas las funciones, gráficas y demás resultados obtenidos. También deben incluir las respuestas a las preguntas planteadas en la guía (breves, al punto). **Asegúrense de incluir todo lo requerido en esta guía. Se verificará que esté todo lo indicado en color azul.**

USEN LA NUMERACIÓN DE LA GUÍA PARA ORGANIZAR SUS RESULTADOS. Por ejemplo, la figura la figura con las gráficas pedida en el inciso 3 de la Segunda Parte debería estar bajo el numeral 3 de una sección titulada “Segunda Parte”. Si lo prefieren, pueden numerar las secciones así: 2.3, 2.4, ..., 3.2, etc. Los incisos de la guía que no requieran resultados (nada en azul) no necesitan aparecer en el reporte (por ejemplo, los de la Primera Parte, o el inciso 1 de la Segunda Parte).

Asegúrense de numerar y titular todas las figuras/gráficas (ej.: Figura 1. Gráficas de entrada y salida del circuito, versus número de muestra).

Asistencia y trabajo en el laboratorio:	20%
Reporte:	80%