

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Desarrollo de herramientas de software para el control individual y seguro del cuadricóptero Crazyflie 2.1 utilizando la placa de expansión de posicionamiento con odometría visual Flow Deck

Protocolo de trabajo de graduación presentado por Pablo Javier
Caal Leiva, estudiante de Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2024

Resumen

En el contexto de ingeniería mecatrónica e ingeniería de control, el estudio de drones resulta de particular interés debido a su versatilidad y capacidad de implementación de algoritmos de control en entornos dinámicos y cambiantes. Hace algunos años, la Universidad del Valle de Guatemala adquirió un conjunto de drones Crazyflie, con lo que inició una línea de investigación para adaptar su uso y control en el entorno académico. Desde entonces, se han llevado a cabo distintos proyectos que han buscado mejorar el uso de los mismos empleando distintas técnicas. A pesar de los avances alcanzados en el uso de drones Crazyflie, las técnicas actuales resultan complejas y poco prácticas de utilizar en un entorno académico debido a su alta curva de aprendizaje.

En este protocolo se propone una alternativa para utilizar los drones Crazyflie de manera individual, sencilla y práctica. Dado que ya se han explorado algunas vías para su uso, se optará por una alternativa de control que no ha sido empleada anteriormente y que consiste en la integración de una placa de expansión para posicionamiento de los drones mediante odometría visual. Con ello en mente, se busca maximizar el uso de los drones, aprovechando su potencial y facilitando su implementación en cursos de ingeniería mecatrónica y electrónica, tales como sistemas de control 1 y 2.

Antecedentes

Los drones Crazyflie han demostrado ser herramientas altamente efectivas en investigación de sistemas de control, ya sea como agentes individuales o dentro de un enjambre. Algunos ejemplos de investigación incluyen estudios sobre algoritmos de evasión de obstáculos, vuelo en enjambre y sistemas de navegación autónoma. Esta eficacia y versatilidad de los drones fue la razón principal por la cual la Universidad del Valle de Guatemala los adquirió hace algunos años y, desde entonces, ha desarrollado diversos proyectos de investigación con ellos.

Investigación con drones Crazyflie en la Universidad del Valle de Guatemala

Sanabria en [1] desarrolló la fase inicial en la línea de investigación con drones Crazyflie. Su trabajo consistió en la implementación de una plataforma de pruebas para cuadricópteros Crazyflie 2.0 sobre la cual se pueden verificar algoritmos de control de actitud para un grado de libertad. Durante su investigación desarrolló las herramientas de software necesarias para comunicar al dron con la computadora a través de Python y por medio del dispositivo Crazyradio. Asimismo, elaboró una interfaz gráfica capaz de recuperar y procesar ángulos de inclinación, manipular la orientación y modificar los parámetros del controlador del dron. Como resultado de la investigación se crearon guías de laboratorio para los cursos de sistemas de control 1 y 2, con la limitante de que el dron únicamente podría utilizarse junto a la plataforma de pruebas.

Ecosistema Robotat

El ecosistema Robotat es un entorno tecnológico de investigación y experimentación ubicado en la Universidad del Valle de Guatemala [2]. Este entorno consiste de una plataforma sólida de aproximadamente 400x500cm, un sistema de captura de movimiento compuesto por seis cámaras OptiTrack y una red local Wi-Fi establecida mediante el protocolo MQTT. La infraestructura permite la conexión y control de múltiples agentes simultáneamente, con una capacidad máxima de 11 agentes operando a una frecuencia de recepción y decodificación de datos superior a 10 Hz.

Incorporación de drones Crazyflie al ecosistema Robotat

Denny Otzoy [3] y José Gordillo [4] se centraron en desarrollar la infraestructura y herramientas necesarias para utilizar el cuadricóptero dentro del ecosistema Robotat. Otzoy se enfocó en el desarrollo de herramientas para la integración con el sistema de captura de movimiento. Empleó una máquina física para la transmisión de datos, desarrolló la representación del dron como cuerpo rígido dentro del ecosistema y codificó las trayectorias en el formato adecuado. Por otro lado, Gordillo implementó un paquete de herramientas de software para la ejecución de trayectorias de enjambre. Evaluó dos alternativas para el sistema de control y con base en un listado de ventajas y desventajas, descartó la opción de la librería Crazyswarm y en su lugar optó por implementar un sistema basado en una antena de comunicación WiFi. En ambos casos, a pesar de los esfuerzos, no se logró el control adecuado o seguimiento de trayectorias debido a limitantes en la metodología empleada para el sistema de control del dron.

A raíz de las limitaciones encontradas, Julio Avila [5] y Brandon Garrido [6] buscaron integrar la librería de control Crazyswarm 2 al ecosistema Robotat. El trabajo de Avila estuvo centrado principalmente en el desarrollo de un servidor para comunicación entre los drones, el sistema de captura de movimiento y Matlab, con el fin de enviar comandos para realizar trayectorias de drones individuales o de enjambre. Por su parte, Garrido se enfocó en el desarrollo de infraestructura para la experimentación y control de múltiples drones desde el sistema operativo ROS2 y dentro del ecosistema Robotat. Los resultados obtenidos en ambas investigaciones demostraron estabilidad y precisión en el control de los drones.

Aunque el manejo de los drones mediante Crazyswarm demostró ser efectivo, posee el desafío de tener conocimientos de los sistemas operativos Linux y ROS2. Esta tarea vuelve complicado el proceso debido a la complejidad de dichas herramientas y la escasa documentación disponible de la librería Crazyswarm 2. Adicionalmente, la transición de Crazyflie a ROS2 es reciente, al igual que la librería Crazyswarm 2, lo que dificulta su implementación en laboratorios. Por otro lado, el uso individual de los drones Crazyflie plantea otro desafío, ya que, sin un medio para conocer su posición, los drones son vulnerables a colisiones debido a la fragilidad de su manipulación. Para abordar dicho desafío, una solución viable es complementar el funcionamiento de los drones con alguna de las placas de expansión de Bitcraze. Una de ellas es el Flow Deck, que ha demostrado ser altamente eficiente en proporcionar estabilidad al dron y con el cual se han logrado proyectos de investigación como vuelo autónomo y seguimiento de trayectorias.

Vuelo autónomo del dron Crazyflie 2.1 empleando la placa de posicionamiento Flow Deck

En la Universidad Uppsala [7] se realizó una investigación utilizando drones Crazyflie 2.1 con el objetivo de incorporar vuelo autónomo a través de trayectorias con obstáculos. Para ello se exploraron dos alternativas para el sistema de navegación del dron: un sistema de posicionamiento local mediante la herramienta LPS (Loco Positioning System) y un sistema de navegación óptico mediante el dispositivo Flow Deck. Para la detección de obstáculos en las trayectorias se utilizó el sensor de detección Multiranger. Durante los experimentos realizados se observó que el sistema de navegación óptico superó al LPS en términos de estabilidad de vuelo y capacidad para completar las trayectorias. No se logró completar pruebas realizadas con el LPS como sistema de posicionamiento, siendo la razón principal el vuelo inestable causado por perturbaciones inusuales en el entorno. Por otro lado, se completaron satisfactoriamente las pruebas al emplear el sistema de navegación óptico con el Flow Deck. Como recomendación, se sugirió realizar pruebas adicionales para mejorar la precisión del vuelo y considerar la posibilidad de utilizar múltiples sistemas de navegación en conjunto para obtener resultados más robustos.

Justificación

Los avances en investigación de ingeniería de control han sido significativamente influenciados por el uso de drones, que se han convertido en herramientas indispensables debido a su alta capacidad para implementar algoritmos de control. Su versatilidad y facilidad de adaptación hacen de los drones un recurso valioso para la enseñanza de cursos relacionados con ingeniería de control y robótica.

En la Universidad del Valle de Guatemala, se han desarrollado distintos proyectos de investigación que han aprovechado las capacidades de los drones Crazyflie. Estos proyectos han explorado distintas aplicaciones, desde su uso en plataformas de pruebas hasta la formación de enjambres de drones en entornos controlados.

Recientemente, se ha desarrollado un conjunto de herramientas que, si bien demostraron ser efectivas, resultan complicadas de utilizar debido a su alta curva de aprendizaje y escasa documentación. En particular, la herramienta Crazyswarm 2 en ROS2 ha demostrado ser efectiva pero difícil de manejar debido a los requerimientos de conocimientos avanzados en Linux y ROS2, así como la falta de documentación disponible. Por ello, surge la necesidad de simplificar las herramientas para facilitar el uso práctico y seguro de los drones.

El propósito de este trabajo de graduación se centra en la oportunidad de ampliar el uso de los drones Crazyflie en la Universidad del Valle de Guatemala, permitiendo su uso independiente y seguro mediante la integración de la placa de expansión para posicionamiento Flow Deck. De esta manera, los drones podrán ser utilizados de forma sencilla en prácticas de laboratorio en cursos de ingeniería electrónica y mecatrónica, como sistemas de control 1 y 2.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar herramientas de software para controlar de manera individual y segura el cuadricóptero Crazyflie 2.1 utilizando la placa de expansión de posicionamiento con odometría visual Flow Deck.

Objetivos específicos

- Realizar la integración, pruebas y validación de la placa de expansión Flow Deck en el dron Crazyflie 2.1 sobre la mesa de pruebas del ecosistema Robotat.
- Desarrollar herramientas de software que permitan simular, controlar y monitorear a los drones Crazyflie 2.1 de forma independiente y segura.
- Desarrollar un conjunto de experimentos que permitan estudiar temas de control de orientación y posición del dron Crazyflie 2.1 en la mesa de trabajo del ecosistema Robotat y que puedan emplearse dentro de los cursos de Sistemas de Control y Robótica.

Marco teórico

Para alcanzar los objetivos planteados, es necesario abordar una serie de temas claves que proporcionarán contexto y comprensión técnica necesarios para desarrollar el proyecto.

Crazyflie 2.1

Los drones Crazyflie son plataformas de desarrollo aéreo de código abierto desarrollados por Bitcraze. Están diseñados principalmente para investigación, desarrollo y educación en ingeniería de control y robótica. Como se observa en la Figura 1, tienen un tamaño reducido, pero están equipados con una variedad de sensores que lo vuelven ideal para explorar algoritmos de control y otras aplicaciones.



Figura 1: Dron Crazyflie 2.1 [8].

El Crazyflie 2.1 es un mini dron que pesa aproximadamente 27 gramos y tiene dimensiones generales de 92mm x 92mm x 29mm. Su control se realiza mediante Bluetooth o radiofrecuencia, lo que le permite ser controlado desde dispositivos móviles, así como desde sistemas operativos Windows, Mac OSX y Linux utilizando Crazyradio o Crazyradio PA. En cuanto a sus características eléctricas, el Crazyflie 2.1 dispone de una batería de litio-polímero (Li-Po) con modos desde 100 mA hasta 980 mA, que alimenta motores, microcontroladores y demás componentes. Utiliza un microcontrolador STM32F405 para el control de vuelo y un microcontrolador nRF51 para la comunicación inalámbrica. Está equipado con un acelerómetro/giroscopio de 3 ejes BMI088 y un sensor de presión de alta precisión BMP388, pero también permite la integración de otras placas de expansión para ampliar sus capacidades, con la restricción de que soporta una carga adicional de hasta 15 gramos que puede afectar el tiempo de vuelo debido al aumento de demanda de energía [8].

Sistema de coordenadas de drones Crazyflie

Los drones Crazyflie, al igual que la mayoría de los drones, utilizan la convención de sistema de coordenadas tridimensional ENU (East North Up) para determinar su posición y orientación en el espacio. Como se observa en la Figura 2, el dron tiene tres ejes principales de referencia: el eje X es horizontal y apunta hacia adelante, el eje Y es horizontal y apunta hacia la derecha y el eje Z es vertical y apunta hacia arriba.

Por otro lado, la orientación del dron se describe en términos de ángulos de inclinación respecto a los ejes de referencia. El ángulo de balanceo (roll) se refiere a la inclinación del dron hacia los lados en torno al eje X, el ángulo de cabeceo (pitch) se refiere a la inclinación hacia adelante o hacia atrás en torno al eje Y, y el ángulo de guiñada (yaw) se refiere a la rotación del dron en torno al eje Z. Según la documentación oficial de Bitcraze, estos ángulos siguen las siguientes reglas de rotación: roll y yaw rotan en sentido horario alrededor del eje al mirar desde el origen, mientras que pitch rota en sentido antihorario alrededor del eje al mirar desde el origen [9].

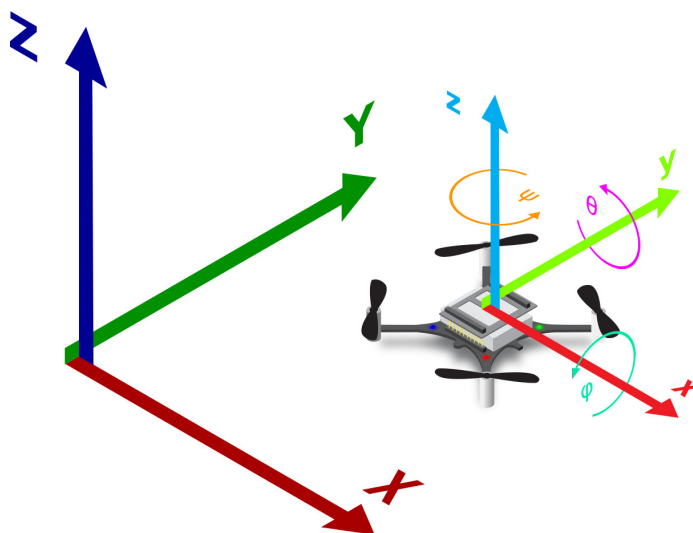


Figura 2: Sistema de coordenadas de Crazyflie 2.1 [9].

Comunicación inalámbrica de drones Crazyflie

Los drones Crazyflie establecen una comunicación inalámbrica por medio del dispositivo Crazyradio, mostrado en la Figura 3. Esta comunicación se basa en un enlace de radiofrecuencia bidireccional que permite enviar comandos de control al dron y recibir datos en tiempo real sobre su posición, orientación y otros parámetros relevantes.



Figura 3: Dispositivo de comunicación inalámbrica Crazyradio [10].

El Crazyradio es un transceptor de radio USB de código abierto, baja latencia y largo alcance. Funciona en la banda de 2.4 GHz con un rango de transmisión de hasta 1 km (en condiciones ideales) gracias a su amplificador de radio de 20 dBm. Está basado en el microcontrolador nRF24LU1 de Nordic Semiconductor y se comunica por medio del protocolo “Enhanced ShockBurst” compatible con los microcontroladores nRF24L01p, nRF51 y nRF52. En una capa de nivel más alto, utiliza el protocolo de paquetes CRTP para comunicarse con el Crazyflie y poder actualizar el firmware, enviar comandos y recibir información de los drones. Dependiendo del sistema operativo, es necesario instalar controladores o realizar configuraciones específicas [10].

Flow Deck

El Flow Deck es una placa de expansión para el dron Crazyflie y que le otorga la capacidad de comprender su movimiento en cualquier dirección. Utiliza una medición de distancias VL53L1x para determinar su altura junto a un sensor de flujo óptico PMW3901 que mide movimientos horizontales sobre la superficie por medio de odometría visual. La placa de expansión Flow Deck, mostrada en la Figura 4, tiene un peso aproximado de 1,6 gramos y dimensiones generales de 21mm x 28mm x 4mm. Para integrarlo se requiere actualizar el firmware del Crazyflie a su última versión y montarlo en la parte inferior del dron. [11].

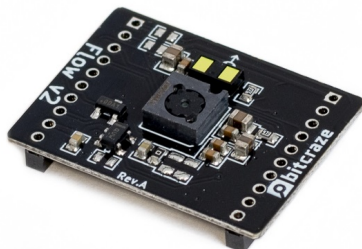


Figura 4: Placa de expansión Flow Deck v2 [11].

Odometría visual

La odometría visual es un proceso mediante el cual se utiliza información extraída de imágenes para estimar el movimiento, en este caso relacionado con un vehículo o robot. En esta técnica de estimación de posición se emplea una secuencia de imágenes para calcular la trayectoria de rasgos visuales distintivos en las imágenes y el análisis de cómo estos cambian entre imágenes consecutivas. Los sistemas de odometría visual son capaces de generar un mapa tridimensional del entorno y un registro de la trayectoria para determinar la localización del agente. En esencia, la odometría visual se basa en la geometría de las imágenes capturadas por cámaras, utilizando algoritmos para minimizar la proyección repetitiva de puntos tridimensionales a partir de las características visuales coincidentes entre imágenes [12].

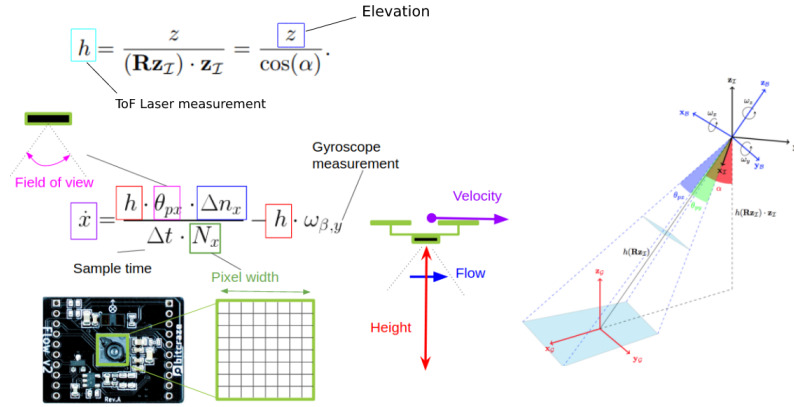


Figura 5: Gráfico de funcionamiento de Flow Deck [13].

Como se mencionó con anterioridad y justo como se evidencia en la Figura 5, el Flow Deck utiliza odometría visual para obtener las mediciones de posición en el plano horizontal. Esta información se combina con las mediciones del sensor de distancia para determinar la posición del Crazyflie en relación con su entorno. [13].

Sensor de flujo óptico PMW3901

El PMW3901 es un sensor de flujo óptico desarrollado por Pixart Imaging, ampliamente utilizado en aplicaciones de robótica para medir movimiento. Resulta de particular interés debido a que forma parte de la placa de expansión Flow Deck de Bitcraze y es el responsable de darle sentido de posición bidimensional (en los ejes X-Y) a los drones Crazyflie. Dentro de sus detalles técnicos, dispone un microcontrolador de bajo consumo que determina internamente el flujo óptico con algoritmos de odometría visual, proporcionando posición con base en diferencias en píxeles entre fotogramas. Opera con un voltaje que varía entre 1.8 y 2.1V. Se comunica por medio de una interfaz SPI de 4 hilos que opera a 2 MHz, transmitiendo datos de movimiento almacenados en registros de 16 bits. Tiene un rango de operación desde 80 mm hasta el infinito y cuenta con una tasa de fotogramas de 121 FPS, detectando movimientos de hasta 7.4 radianes por segundo. Finalmente, está encapsulado en un paquete chip-on-board de 28 pines, lo que permite su integración en distintas aplicaciones [14].

Sensor de medición de distancias VL53L1x

El VL53L1x es un sensor de medición de distancias desarrollado por STM electronics. La placa de expansión Flow Deck tiene integrado este sensor para proporcionar sentido de altura de vuelo (eje Z) a los drones Crazyflie. En cuanto a sus especificaciones técnicas, el VL53L1x está basado en la tecnología de tiempo de vuelo (Time-of-Flight, ToF) que permite medir el tiempo que tarda un pulso de luz en reflejarse desde un objeto y volver al sensor, proporcionando una medida precisa de la distancia del objeto. El sensor funciona emitiendo un láser invisible de 940 nm y utiliza una matriz de recepción SPAD (diodo de avalancha de fotón único) para detectar la luz reflejada, ofreciendo un campo de visión típico de 27 grados. Incluye un microcontrolador de bajo consumo que permite una medición de distancia de hasta 4 metros con una frecuencia de hasta 50 Hz y se comunica por medio de una interfaz I2C que soporta velocidades de hasta 400 kHz [15].

Librería en Python para Crazyflie

Existe una librería en Python desarrollada por el grupo Bitcraze cuya función es simplificar el uso y control de los drones Crazyflie. Esta librería dispone de funciones de alto nivel que facilitan la conexión, registro de datos, envío de comandos y manipulación de parámetros del dron. Está diseñada para ser utilizada con los drones Crazyflie por medio del dispositivo Crazyradio, admitiendo enlaces de comunicación mediante diferentes interfaces tales como radio, USB, serial, entre otras. Dentro de las funciones de alto nivel que presenta, están algunas para envío de comandos de control de actitud y posición, así como otras para configuración de registros y monitoreo de variables del firmware en tiempo real [16].

Protocolo de comunicación CRTP

CRTP es el protocolo de empaquetamiento de datos utilizado para comunicarse con los drones Crazyflie. Este protocolo estructura los paquetes de información para dirigirlos a funcionalidades específicas del dron como el registro de datos, control de movimiento y parámetros de configuración [17].

Pila de comunicación

La comunicación con Crazyflie se implementa como una pila de capas independientes. En la base se encuentra el medio físico (radio o USB), seguido por el enlace que garantiza la transmisión segura y ordenada de paquetes. Encima de esto está CRTP que maneja información de puerto y canal para dirigir los paquetes de datos a los distintos subsistemas del Crazyflie. Por último, los subsistemas implementan las funcionalidades del dron, controladas a través de CRTP.

Implementación de enlaces

Existen dos implementaciones de enlace activamente soportadas para Crazyflie: el enlace de radio, que utiliza radios compatibles con nRF24, y el enlace USB, que se conecta directamente al puerto USB del Crazyflie. Cada uno de estos enlaces asegura la transmisión ordenada y segura de paquetes entre el controlador y el dron.

Ordenación de paquetes y soporte en tiempo real

CRTP (Crazy RealTime Protocol) prioriza los paquetes para facilitar el control en tiempo real del Crazyflie. El enlace garantiza el orden estricto de los paquetes dentro de un mismo puerto, aunque los paquetes de diferentes puertos pueden enviarse fuera de orden. La priorización se logra asignando mayor prioridad a los números de puerto más bajos, permitiendo la transmisión simultánea de datos en tiempo real y la carga de trayectorias.

Metadatos del paquete CRTP

Cada paquete CRTP incluye un número de puerto, un número de canal y una carga útil. Los puertos oscilan entre 0 y 15 y los canales entre 0 y 3, con la carga útil limitada a 31 bytes. Estos metadatos permiten dirigir los paquetes a los subsistemas correctos y las funcionalidades específicas dentro del Crazyflie.

Paquetes especiales

El paquete 15:3 es un caso especial denominado null packet, que es ignorado por el Crazyflie y las bibliotecas CRTP. Los null packets se usan para solicitar datos descendentes cuando no hay datos para enviar. También se utilizan para comunicar paquetes fuera del flujo de datos principal, como los paquetes de bootloader, interpretados por el chip de radio nRF51 del Crazyflie.

Asignación de puertos

Los puertos CRTP se asignan a distintos subsistemas en el Crazyflie, permitiendo la comunicación bidireccional entre un subsistema específico y su manejador en tierra. Por ejemplo, el puerto 0 se utiliza para leer el texto de la consola, el puerto 2 para obtener y establecer parámetros, y el puerto 3 para enviar puntos de control de movimiento.

Procedimiento de conexión

Generalmente, CRTP es sin conexión y la mayoría de los subsistemas del Crazyflie intentan ser sin estado. Sin embargo, algunos enlaces y subsistemas mantienen estados específicos, como el enlace USB que necesita ser habilitado mediante un paquete de control USB, y el

enlace de radio que utiliza contadores de paquetes para evitar pérdidas y garantizar el orden. La conexión típica incluye inicializar el enlace y los subsistemas soportados, asegurando la transmisión de datos correcta y segura.

Metodología

Integración, pruebas y validación de la placa de expansión Flow Deck en el dron Crazyflie 2.1 sobre la mesa de pruebas del ecosistema Robotat

1. Realizar una revisión de la documentación y de los antecedentes existentes relacionados con el uso del dron Crazyflie.
2. Ejecutar pruebas iniciales de vuelo con el dron Crazyflie siguiendo las instrucciones detalladas en el manual proporcionado por Bitcraze en su página oficial.
3. Revisar la documentación disponible relacionada con la placa de expansión Flow Deck.
4. Instalar el dispositivo Flow Deck en el dron Crazyflie y verificar su correcta integración en el software Crazyclient.
5. Realizar pruebas de vuelo con el dispositivo integrado sobre distintas superficies para evaluar su desempeño en distintos entornos.
6. Verificar el funcionamiento del dron con el dispositivo dentro del ecosistema Robotat.
7. En caso de presentar un funcionamiento errático, evaluar alternativas para validar su uso dentro del ecosistema, por ejemplo, diseñar una manta vinílica para mejorar el desempeño del Flow Deck.

Desarrollo de herramientas de software para simular, controlar y monitorear a los drones Crazyflie 2.1 de forma independiente y segura

1. Revisar la documentación disponible de la librería de Python proporcionada por Bitcraze para controlar el dron Crazyflie.
2. Familiarizarse con la librería y realizar los tutoriales de uso presentados en la página oficial de Bitcraze.
3. Investigar el funcionamiento de la librería e identificar el método de envío de datos hacia el dispositivo de comunicación por radiofrecuencia Crazyradio.
4. Estudiar y comprender el protocolo de empaquetamiento de datos CRTP.
5. Migrar el funcionamiento de la librería de Python a Matlab, o en caso de que no sea posible, emplear desde comandos de Matlab la librería de Python para Crazyflie.
6. Realizar experimentos de vuelo sencillos utilizando las herramientas desarrolladas en Matlab.
7. Evaluar el modelo existente de Crazyflie en el simulador de robótica Webots y verificar la posibilidad de utilizarlo como otra herramienta de investigación en la universidad.

8. Realizar pruebas empleando el simulador Webots e integrarlo con las herramientas desarrolladas.
9. Realizar experimentos con las herramientas desarrolladas junto con lecturas del sistema de captura de movimiento del Robotat.

Conjunto de experimentos que permitan estudiar temas de control de orientación y posición del dron Crazyflie 2.1

1. Utilizando las herramientas de software anteriormente desarrolladas, identificar un conjunto de experimentos con drones que resulten prácticos en laboratorios de los cursos de sistemas de control 1 y 2.
2. Realizar los experimentos identificados y evaluar su eficacia y practicidad.
3. Desarrollar guías de laboratorio con los experimentos validados.
4. Evaluar la practicidad de las guías de laboratorio desarrolladas con alumnos que actualmente estén cursando los cursos de sistemas de control y validar los resultados que obtengan.
5. Según los resultados obtenidos en las pruebas de los estudiantes, realizar las modificaciones necesarias a las herramientas y/o guías de laboratorios desarrolladas.
6. Realizar nuevamente los experimentos para validar las modificaciones.
7. Presentación de resultados para validación de guías de laboratorio.

Cronograma de actividades

				Junio			Julio				Agosto				Septiembre					
No.	Nombre de la tarea	Fecha de inicio	Fecha de finalización	03.06.2024	10.06.2024	17.06.2024	24.06.2024	01.07.2024	08.07.2024	15.07.2024	22.07.2024	29.07.2024	05.08.2024	12.08.2024	19.08.2024	26.08.2024	02.09.2024	09.09.2024	16.09.2024	23.09.2024
1	Integración, validación y pruebas de la placa de expansión Flow Deck																			
1.1	Revisión de documentación y antecedentes del dron	03.06.2024	05.06.2024																	
1.2	Ejecución de pruebas de vuelo iniciales	05.06.2024	07.06.2024																	
1.3	Revisión de documentación de placa Flow Deck	03.06.2024	05.06.2024																	
1.4	Instalación y validación de Flow Deck	05.06.2024	07.06.2024																	
1.5	Pruebas de vuelo con la placa Flow Deck instalada	10.06.2024	14.06.2024																	
1.6	Verificación del funcionamiento del sensor sobre plataforma Robotat	10.06.2024	14.06.2024																	
1.7	Búsqueda de alternativas para validar el uso del Flow Deck dentro del Robotat	17.06.2024	21.06.2024																	
2	Desarrollo de herramientas de software																			
2.1	Revisión de documentación de la librería de Python Cylib utilizada para control del dron	17.06.2024	21.06.2024																	
2.2	Familiarizarse con la librería y realizar tutoriales de uso	18.06.2024	21.06.2024																	
2.3	Identificar y analizar el método de envío de datos entre la librería y el dispositivo Crazyradio	24.06.2024	19.07.2024																	
2.4	Estudiar el protocolo de empaquetamiento CRTP	24.06.2024	19.07.2024																	
2.5	Migrar el funcionamiento de la librería de Python a Matlab, o bien, utilizar la librería de Python desde Matlab	01.07.2024	26.07.2024																	
2.6	Realizar experimentos de vuelo sencillos empleando las herramientas desarrolladas	15.07.2024	02.08.2024																	
2.7	Evaluar y validar el uso del simulador Webots como parte de las herramientas de software	29.07.2024	16.08.2024																	
2.8	Integrar las distintas herramientas desarrolladas	29.07.2024	16.08.2024																	
2.9	Experimentos con herramientas desarrolladas y lecturas del sistema de captura de movimiento Robotat	12.08.2024	16.08.2024																	
3	Experimentos con dron para prácticas de laboratorio																			
3.1	Identificar el conjunto de experimentos para realizar en prácticas de laboratorio	19.08.2024	20.08.2024																	
3.2	Hacer pruebas de los experimentos identificados	20.08.2024	22.08.2024																	
3.3	Desarrollar las guías para las prácticas de laboratorio	22.08.2024	23.08.2024																	
3.4	Realizar los experimentos con estudiantes de los cursos de control	26.08.2024	06.09.2024																	
3.5	Evaluar los resultados obtenidos en las primeras pruebas hechas por los estudiantes	04.09.2024	06.09.2024																	
3.6	Realizar las modificaciones necesarias en las herramientas y/o guías de laboratorio	09.09.2024	13.09.2024																	
3.7	Realizar nuevamente los experimentos con estudiantes para validar las nuevas modificaciones	11.09.2024	20.09.2024																	
3.8	Presentación de resultados para validar guías de laboratorio desarrolladas	23.09.2024	25.09.2024																	
3.9	Resultados finales	26.09.2024	30.09.2024																	
4	Redacción de documento de tesis	03.06.2024	30.09.2024																	

Índice preliminar

1. **Prefacio**
2. **Lista de figuras**
3. **Resumen**
4. **Abstract**
5. **Introducción**
6. **Antecedentes**
7. **Justificación**
8. **Objetivos**
 - a) Objetivo general
 - b) Objetivos específicos
9. **Alcance**
10. **Marco teórico**
 - a) Crazyflie 2.1
 - b) Sistema de coordenadas de Crazyflie
 - c) Comunicación inalámbrica de Crazyflie mediante Crazyradio
 - d) Placa de expansión Flow Deck
 - e) Odometría Visual
 - f) Sensor de altura PMW3901
 - g) Sensor de flujo óptico VL53L1x
 - h) Librería de Python para Crazyflie
 - i) Protocolo de empaquetamiento de datos CRTP
 - j) Matlab
 - k) Webots
11. **Integración, pruebas y validación de la placa de expansión Flow Deck**
12. **Desarrollo de herramientas de software para uso de drones Crazyflie**
13. **Conjunto de experimentos con drones Crazyflie**
14. **Guías de laboratorio para cursos de sistemas de control 1 y 2**
15. **Resultados**
16. **Conclusiones**
17. **Recomendaciones**
18. **Bibliografía**
19. **Anexos**
20. **Glosario**

Referencias

- [1] F. Sanabria, “Diseño e implementación de una plataforma de pruebas para sistemas de control para el dron Crazyflie 2.0,” Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2022.
- [2] C. Perafan, “Robotat: un ecosistema robótico de captura de movimiento y comunicación inalámbrica,” Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2022.
- [3] D. Otzoy, “Uso del cuadricóptero Crazyflie dentro del ecosistema Robotat para la generación de trayectorias y la evasión de obstáculos,” Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2023.
- [4] J. Gordillo, “Diseño e implementación de un paquete de herramientas de software para controlar inalámbricamente un enjambre de drones Crazyflie dentro de un ecosistema robótico basado en captura de movimiento,” Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2023.
- [5] J. Avila, “Adaptación del sistema de drones Crazyswarm al ecosistema Robotat,” Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2023.
- [6] B. Garrido, “Levantamiento de una plataforma de pruebas para sistemas multidrones con OptiTrack y Crazyswarm,” Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2023.
- [7] C. Chadehumbe y J. Sjöberg, “Autonomous flight of the micro drone Crazyflie 2.1 through an obstacle course,” Independent thesis basic level (degree of Bachelor), Universidad Uppsala, 2020.
- [8] Bitcraze, *Crazyflie 2.1*, <https://www.bitcraze.io/products/crazyflie-2-1/>, Accedido el 12/05/2024.
- [9] Bitcraze, *Sistema de coordenadas de Crazyflie 2.1*, <https://www.bitcraze.io/documentation/system/platform/cf2-coordinate-system/>, Accedido el 12/05/2024.
- [10] Bitcraze, *Crazyradio*, <https://www.bitcraze.io/products/crazyradio-pa/>, Accedido el 12/05/2024.
- [11] Bitcraze, *Flow Deck v2*, <https://www.bitcraze.io/products/flow-deck-v2/>, Accedido el 12/05/2024.
- [12] M. Persson, *Visual Odometry in Principle and Practice*, 1.^a ed. Linköping University, 2022, ISBN: 978-91-7929-168-6.
- [13] “Estimación de estado con la placa de expansión Flow Deck.” (), dirección: https://www.bitcraze.io/documentation/repository/crazyflie-firmware/master/functional-areas/sensor-to-control/state_estimators/#flowdeck-measurement-model.
- [14] “PMW3901MB-TXQT: Optical Motion Tracking Chip.” (), dirección: https://wiki.bitcraze.io/_media/projects:crazyflie2:expansionboards:pot0189-pmw3901mb-txqt-ds-r1.00-200317_20170331160807_public.pdf.
- [15] “VL53L1X: Time-of-Flight (ToF) ranging sensor based on ST’s FlightSense technology.” (), dirección: <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/vl53l1x.html#overview>.

- [16] Bitcraze, *The Crazyflie Python API explanation*, https://www.bitcraze.io/documentation/repository/crazyflie-lib-python/master/user-guides/python_api/, Accedido el 25/05/2024.
- [17] Bitcraze, *CRTP - Communication with the Crazyflie*, <https://www.bitcraze.io/documentation/repository/crazyflie-firmware/master/functional-areas/crtp/>, Accedido el 25/05/2024.