

# Jornadas de Automática

## Crazyflie como Plataforma Educativa: Innovando la Formación en Automática

Caballero-Martin, D.<sup>a</sup>, Satama-Bermeo, G.<sup>a</sup>, Affou, H.<sup>a</sup>, Teso-Fz-Betoño, D.<sup>b</sup>, Aramendia, I.<sup>b</sup>, Lopez-Guede, JM.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), C/ Nieves Cano, n° 12, 01006 Vitoria-Gasteiz, España.

<sup>b</sup>Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), C/ Nieves Cano, n° 12, 01006 Vitoria-Gasteiz, España.

**To cite this article:** Caballero-Martin, D., Satama-Bermeo, G., Affou, H., Teso-Fz-Betoño, D., Aramendia, I., Lopez-Guede, J.M. 2024. Crazyflie as an Educational Platform: Innovating Training in Automation. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10899>

### Resumen

La significativa evolución y mejora de los drones ha impulsado su uso como plataforma de experimentación en el campo de la Automática, tanto en educación como en investigación, destacándose su modularidad y versatilidad. Este artículo ofrece una revisión de las principales configuraciones posibles con los drones Crazyflie de Bitcraze, una plataforma flexible y con muchas posibilidades para la formación en Automática. Su diseño compacto facilita la integración de nuevos sensores y módulos, así como la explicación de sistemas de posicionamiento como Lighthouse y Loco Positioning. También se introducen las implementaciones de controladores PID para garantizar la estabilidad y control del vuelo, que son modificables por el alumnado. Además, se analizan los beneficios de usar drones en entornos educativos, mejorando tanto la enseñanza práctica como teórica en Automática. En resumen, este estudio reconoce el impacto transformador de los drones en la educación en Automática y destaca su papel en la innovación educativa, creando un entorno académico más dinámico y atractivo.

*Palabras clave:* Robots voladores, Telerrobótica, Sistemas robóticos autónomos, Enseñanza de control mediante equipos de laboratorio, Control de misión y operaciones, Simulación).

### Crazyflie as an Educational Platform: Innovating Training in Automation

#### Abstract

The significant evolution and improvement of drones has boosted their use as a platform for experimentation in the field of Automation, both in education and research, highlighting their modularity and versatility. This article provides a review of the main configurations possible with Bitcraze's Crazyflie drones, a flexible platform with many possibilities for training in Automation. Its compact design facilitates the integration of new sensors and modules, as well as the explanation of positioning systems such as Lighthouse and Loco Positioning. PID controller implementations are also introduced to ensure flight stability and control, which can be modified by the students. Furthermore, the benefits of using drones in educational environments are analysed, improving both practical and theoretical teaching in Automation. In summary, this study recognises the transformative impact of drones in automation education and highlights their role in educational innovation, creating a more dynamic and engaging academic environment.

*Keywords:* Flying robots, Telerobotics, Autonomous robotic systems, Control education using laboratory equipment, Mission control and operations, Simulation).

\* Autor para correspondencia: [jm.lopez@ehu.es](mailto:jm.lopez@ehu.es)

## 1. Introducción

La automática se ha consolidado como un pilar fundamental en la optimización y control de sistemas complejos. Debido a su enfoque basado en el diseño de mecanismos capaces de operar de manera autónoma, se presentan avances significativos en diversas áreas industriales. Entre las tecnologías emergentes más beneficiadas en este contexto, se encuentran los drones.

El avance tecnológico de los drones ha marcado un hito importante en sectores como la agricultura, la inspección de infraestructuras y la vigilancia medioambiental. Estos dispositivos han pasado de ser simplemente herramientas de vuelo remoto a sistemas capaces de realizar misiones complejas de manera autónoma. Este progreso se debe en gran medida a la integración de controladores avanzados, pero sin dejar de lado controladores clásicos como el PID (Proporcional Integral Derivativo), que permiten un control preciso y estable del vuelo (Xin et al., 2020).

Los PID son fundamentales por su capacidad para mantener la estabilidad de un sistema mediante ajustes continuos en respuesta a las desviaciones del estado deseado. En el contexto de los drones, estos controladores permiten manejar variables críticas como la altitud, la velocidad y la orientación como en (Sun and Cheng, 2017; Jong-Hwan et al., 2017).

El uso de drones equipados con controladores PID ha demostrado ser especialmente eficaz en aplicaciones que requieren un alto grado de precisión y fiabilidad. Por ejemplo, en la agricultura de precisión, los drones pueden monitorizar cultivos y aplicar tratamientos específicos con exactitud (Puri et al., 2017). En la inspección de infraestructuras, pueden acceder a lugares de difícil acceso y realizar evaluaciones detalladas sin riesgo para los operarios (Naranjo et al., 2023; Pichierri et al., 2023; Zekry et al., 2024).

La estructura del resto del documento es la siguiente. La sección 2 se centra en explicar la adaptabilidad para la experimentación del CrazyFlie (CF) (Figura 1) enfocado en los beneficios para la automática. En la sección 3 se detallan las configuraciones principales y la modularidad de los CF. La sección 4 presenta los sistemas de posicionamiento existentes, mientras que la sección 5 ofrece una explicación del rol del controlador PID en los CF. Por último, en la sección de conclusiones se exponen las principales conclusiones y se señalan futuras líneas de investigación.

## 2. Crazyflie para experimentación en Automática

En el ámbito de la educación en automática, contar con una plataforma versátil y adaptable es fundamental para explorar nuevos conceptos, desarrollar algoritmos de control innovadores y probar soluciones en entornos controlados y realistas. Los CF han surgido como una opción líder en este campo, ofreciendo una combinación única de características que los hacen ideales para una amplia gama de aplicaciones y proyectos (Bitcraze, 2024c).

Estos dispositivos representan una opción excepcional para la educación en el campo de la Automática. Debido a su diseño modular, arquitectura abierta y compatibilidad con diversos entornos de desarrollo, se convierten en una herramienta indispensable para la comunidad científica y académica. En el

campo de la investigación y educación, proporcionan libertad y flexibilidad para poder explorar nuevos conceptos, desarrollar soluciones innovadoras y contribuir con avances significativos en el área de la Automática (Giernacki et al., 2017).

### 2.1. Diseño Modular y Compacto

Los CF, desarrollados por Bitcraze, se destacan por su diseño modular y compacto. Estos drones, están diseñados para ser fácilmente transportables, lo que los convierte en la elección perfecta para experimentos en cualquier entorno. Su tamaño reducido y su peso ligero no comprometen su capacidad de vuelo, lo que les permite maniobrar con agilidad y precisión en espacios cerrados.

### 2.2. Arquitectura Abierta y Personalizable

Una de las características más distintivas de los CF es su arquitectura abierta y personalizable. Los usuarios tienen acceso completo tanto al hardware como al software de los drones, lo que les permite modificar y ampliar sus capacidades según sus necesidades específicas. Esto simplifica la incorporación de sensores adicionales, dispositivos de control y periféricos, así como la implementación de algoritmos de control a medida. Además, la comunidad de desarrolladores ha contribuido con una amplia variedad de complementos y extensiones, lo que amplía aún más las posibilidades de personalización de los CF.

### 2.3. Escalabilidad y Adaptabilidad

Otra ventaja significativa de los CF es su escalabilidad y adaptabilidad. Estos drones están diseñados para funcionar de manera independiente o en conjunto, lo que permite al personal de investigación y educación crear enjambres de drones para realizar tareas colaborativas y coordinadas (Preiss et al., 2017; Fernando and Liu, 2019). Esta capacidad abre nuevas oportunidades en campos como la exploración de entornos desconocidos, la vigilancia de áreas extensas y la entrega de carga en múltiples ubicaciones. Además, la modularidad de los CF facilita la actualización y mejora continua de sus capacidades, lo que garantiza que sigan siendo relevantes y efectivos en un entorno de académico en constante evolución.



Figura 1: CrazyFlie 2.1

## 3. Configuración del CrazyFlie

Configurar el CF para su uso en proyectos de automática requiere una serie de pasos que aseguren su rendimiento óptimo y precisión en la ejecución de tareas complejas. Debido a su diseño modular permite la integración de nuevos sensores y dispositivos, lo que facilita la expansión de sus capacidades y la adaptabilidad a los experimentos que se deseen realizar.

Primeramente, es esencial montar el hardware del CF. Este proceso incluye la instalación de los motores y el montaje de las hélices, asegurándose de que las hélices de rotación en sentido horario (CW) y en sentido antihorario (CCW) estén correctamente posicionadas para mantener la estabilidad durante el vuelo (Figura 2). La batería debe conectarse firmemente en su compartimento, garantizando que esté cargada antes de proceder con las calibraciones necesarias (Figura 3) (Bitcraze, 2024d).

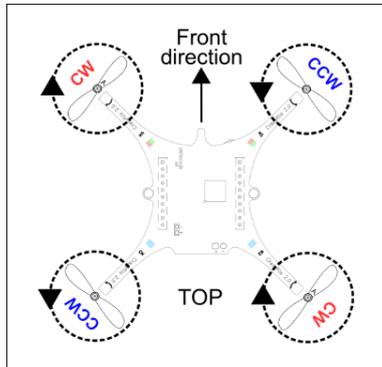


Figura 2: Diagrama de rotación de hélices

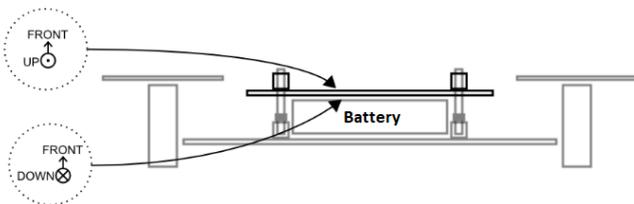


Figura 3: Localización de batería en CrazyFlie

La calibración del *acelerómetro*, *giroscopio* y *magnetómetro*, es esencial para la precisión en la medición de datos durante el vuelo. Para poder realizar estas calibraciones, se debe instalar el cliente *Crazyflie PC Client*. Este software es esencial para la configuración inicial, el control manual y las actualizaciones de firmware. Primeramente, se debe actualizar el firmware del CF para garantizar la integración de las últimas mejoras y corrección de errores. Para poder realizar una comunicación directa entre un equipo y el dron, se debe disponer de un *Crazyradio PA*, este dispositivo se encarga de la comunicación con el dron mediante la tecnología de radio.

1. **Calibración del Acelerómetro:** Se debe colocar el CF en una superficie plana. Utilizando el cliente Crazyflie PC Client para iniciar la calibración. Este procedimiento, implica tener el dron inmóvil mientras el software ajusta los parámetros necesarios.
2. **Calibración del Giroscopio:** Este procedimiento se realiza de manera análoga a la calibración del acelerómetro. Es fundamental que el dron permanezca inmóvil durante la calibración para asegurar la precisión en las mediciones de las tasas angulares de rotación.
3. **Calibración del Magnetómetro:** Se debe colocar el CF en un entorno libre de interferencias magnéticas, evitando áreas con objetos metálicos grandes o dispositivos

electrónicos que puedan distorsionar el campo magnético. La calibración se debe realizar mediante el cliente Crazyflie PC Client. Es recomendable recalibrar el magnetómetro periódicamente, especialmente si el CF se ha utilizado en diferentes entornos o ha sufrido golpes que puedan afectar su precisión. Realizar una calibración adecuada del magnetómetro garantiza que el CF pueda volar de manera estable y precisa, mejorando su rendimiento en tareas de navegación y control.

Debido a su modularidad intrínseca, proporciona la posibilidad de añadir nuevos sensores o dispositivos de control. Para poder añadir un nuevo dispositivo y dependiendo de las necesidades del proyecto, se pueden seleccionar los dispositivos de expansión apropiados, como cámaras, LIDAR, sensores de gas o módulos GPS.

Una vez instalados los nuevos módulos, es recomendable actualizar de nuevo el firmware del CF. Por otro lado, en el caso de añadir nuevos sensores adicionales, también deben ser calibrados, utilizando el software adicional proporcionado. Estas modificaciones pueden requerir ajustes específicos en el firmware o el software de control para integrar correctamente los nuevos sensores. Para poder verificar el correcto funcionamiento de la aeronave después de realizar dichas modificaciones, es recomendable realizar pruebas de vuelo en un entorno controlado para verificar que todos los módulos funcionan correctamente y que el dron responde según lo esperado. La localización precisa de los módulos adicionales en los CF es de vital importancia para garantizar un rendimiento óptimo (Bitcraze, 2024b). La posición adecuada de estos módulos, ya sean sensores u otros dispositivos periféricos, influye directamente en la capacidad del CF para ejecutar tareas específicas con precisión y eficiencia (Figura 4 y 5).

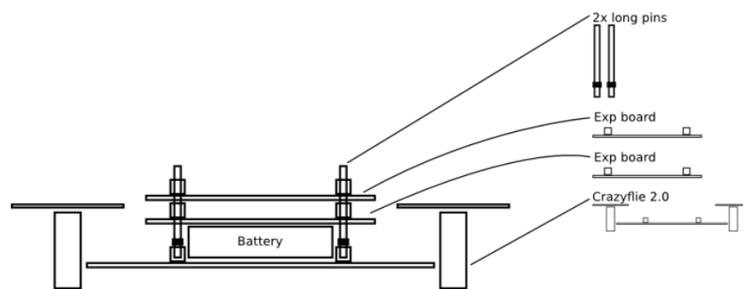


Figura 4: Expansión CF superior

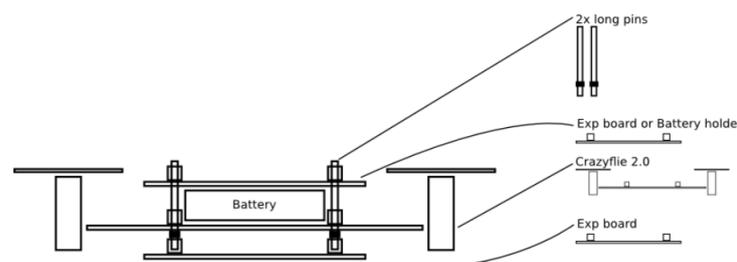


Figura 5: Expansión CF superior e inferior

## 4. Sistemas de posicionamiento

En el campo del posicionamiento de los CF, existen diversas tecnologías destinadas a garantizar una navegación más precisa y fiable. Desde la integración de módulos GPS para vuelos al aire libre hasta el despliegue de sistemas de posicionamiento sin GPS para vuelos en interiores como *Lighthouse Positioning System*, *Loco Positioning System* y *Motion Capture Positioning*. A continuación, se presenta una explicación ilustrativa de cada uno de los sistemas de posicionamiento alternativos al GPS para vuelos interiores (Bitcraze, 2024i; Neumann et al., 2019).

### 4.1. Lighthouse Positioning System

Lighthouse Positioning System (LPS) es el sistema más actualizado de posicionamiento desarrollado por Bitcraze y utiliza estaciones base (Lighthouse Base Stations) que emiten señales de luz infrarroja en intervalos regulares. Estas estaciones base están colocadas en posiciones fijas y conocidas en el entorno de vuelo. Los CF están equipados con receptores (Lighthouse Positioning Deck) que captan estas señales de luz y calculan su posición y orientación en relación con las estaciones base. Al utilizar múltiples estaciones base, el sistema determina la posición tridimensional del CF (Kilberg et al., 2020). Esto permite una navegación precisa en entornos interiores donde no hay señales GPS disponibles, lo que lo hace ideal para aplicaciones de vuelo en dichos entornos (Figura 6) (Bitcraze, 2024f).

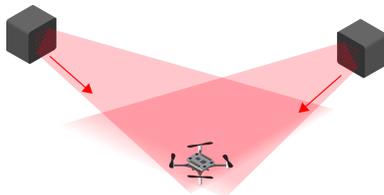


Figura 6: Diagrama de posicionamiento LPS

### 4.2. Loco Positioning System

Loco Positioning System (LoPS) es una tecnología avanzada utilizada para el posicionamiento preciso de los CF en entornos interiores (Figura 7) (Avadhanula, 2023; Chu et al., 2022). Este sistema utiliza módulos Ultra-Wideband (UWB) basados en el DWM1000 de Decawave, teniendo la capacidad de medir distancias entre sí con alta precisión. Para obtener una localización precisa, se requieren al menos cuatro, pero preferentemente ocho nodos de posicionamiento Loco junto con un Deck de posicionamiento Loco instalado en cada CF.

El CF, equipado con estos módulos, puede calcular su propia posición a bordo mediante la triangulación de las distancias medidas entre los nodos de posicionamiento. Este método no solo proporciona una alta precisión en la determinación de la ubicación, sino que también permite una mayor autonomía del dron en sus operaciones (Bitcraze, 2024g).

Actualizar el firmware de los nodos de posicionamiento y de los Decks regularmente es esencial para asegurar un rendimiento óptimo del sistema y mantener la precisión en el posicionamiento del CF. Para efectuar la actualización, es preciso

descargar la versión más reciente del firmware para cada dispositivo y emplear el software Loco Positioning Configuration Tool para actualizar el firmware desde un ordenador (Bitcraze, 2024e).



Figura 7: Diagrama de posicionamiento LoPS

### 4.3. Motion Capture Positioning

El sistema Motion Capture Positioning (MCP) permite al CF determinar su ubicación utilizando marcadores reflectantes y cámaras infrarrojas (Figura 8). El principio básico de la captura de movimiento para posicionamiento consiste en que las cámaras emiten luz infrarroja, la cual es reflejada por marcadores especiales en el dron. Estas cámaras detectan la ubicación de los marcadores reflectantes, y el software de captura de movimiento en un ordenador externo calcula la posición exacta del dron (Bitcraze, 2024h; Leong and Hesse, 2019; Punpikul and Thammawichai, 2019). Esta información se transmite al CF a través del Crazyradio 2.0 o Crazyradio PA. Esta solución avanzada asegura que el CF pueda operar con alta precisión en entornos controlados.

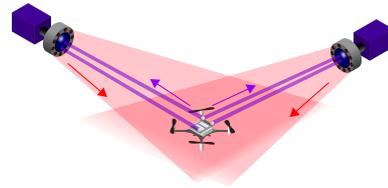


Figura 8: Diagrama de posicionamiento MCP

## 5. Controladores PID de los Crazyflie

En los CF se implementan controladores PID para regular tanto la actitud (orientación), incluyendo los ángulos de roll (alabeo), pitch (cabeceo) y yaw (guiñada), como la altitud del dron, garantizando así una estabilización precisa y una maniobrabilidad óptima durante el vuelo (Bitcraze, 2024a).

### 5.1. Control de Actitud

El control de actitud involucra tres ejes de rotación: roll (alabeo), pitch (cabeceo) y yaw (guiñada). Cada uno de estos ejes tiene su propio controlador PID, encargado de minimizar el error entre el ángulo deseado y el ángulo actual medido por los sensores del dron (acelerómetros y giroscopios). La salida del controlador PID se utiliza para ajustar la velocidad de los motores y lograr la orientación deseada (Figura 9 y 10) (Gün, 2023; Zekry et al., 2023).

### 5.2. Control de Altitud

El control de altitud utiliza un controlador PID adicional que regula la potencia total suministrada a los motores para mantener o cambiar la altitud del dron. Este controlador considera la diferencia entre la altitud deseada y la altitud medida,

generalmente utilizando un sensor de presión barométrica o un sensor de distancia (Figura 9 y 10) (Noordin et al., 2023).

### 5.3. Configuración y Ajuste de Parámetros PID

El ajuste de los parámetros PID (ganancias proporcional, integral y derivativa) es crucial para el rendimiento óptimo del dron. Los parámetros pueden ajustarse utilizando el software Crazyflie PC Client o a través de scripts personalizados (Zekry et al., 2024).

#### 5.3.1. Procedimiento de Ajuste

- Ajuste del Término Proporcional (P):** Se debe ajustar la ganancia proporcional. Incrementar este valor mejorará la respuesta del sistema, pero si es demasiado alto, puede causar oscilaciones.
- Ajuste del Término Integral (I):** Se debe añadir una pequeña cantidad de ganancia integral para corregir cualquier error constante que persista después de ajustar el término proporcional. Este valor, debe ajustarse cuidadosamente, ya que un valor integral demasiado alto puede llevar a un comportamiento oscilatorio.
- Ajuste del Término Derivativo (D):** Se ajusta el término derivativo para mejorar la estabilidad y reducir las oscilaciones. Este término debe ser ajustado con cuidado, ya que un valor derivativo alto puede causar inestabilidad.

#### 5.3.2. Visualización y Análisis de Datos

Para un ajuste preciso de los parámetros PID, es útil registrar y analizar datos de vuelo. Desde Crazyflie PC Client se pueden visualizar gráficos en tiempo real de los errores, las salidas de los controladores y otros parámetros relevantes. Esta información es crucial para entender cómo cada ajuste afecta el comportamiento del dron.

### 5.4. Consideraciones Prácticas

- **Entorno de Prueba Controlado:** Se deben realizar los ajustes de los parámetros PID en un entorno controlado para minimizar riesgos y asegurar un comportamiento seguro del dron.
- **Reajuste Periódico:** Los parámetros PID pueden necesitar reajustes periódicos debido al desgaste de los componentes mecánicos, cambios en las condiciones de vuelo o la adición de nuevos módulos y sensores.
- **Documentación y Reversión:** Se deben documentar todos los cambios realizados en los parámetros PID y mantener la capacidad de revertir a una configuración previa si los ajustes no mejoran el rendimiento.

### 5.5. Impacto de los Controladores PID en el rendimiento del CF

Los controladores PID son componentes críticos para el control preciso y estable de los CF. La correcta implementación y ajuste de estos controladores permite que los drones mantengan su orientación y altitud deseadas con alta precisión, lo cual es fundamental para aplicaciones avanzadas de

automática. Mediante la utilización de herramientas de visualización y análisis de datos, el personal de investigación, educación y desarrollo pueden optimizar los parámetros PID para lograr un rendimiento óptimo en diversas condiciones de vuelo.

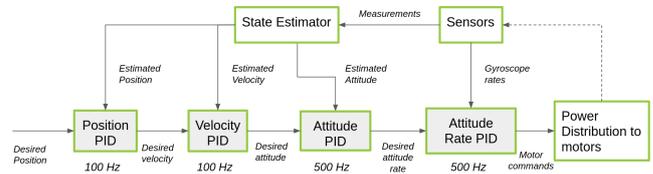


Figura 9: Esquema de implementación PID

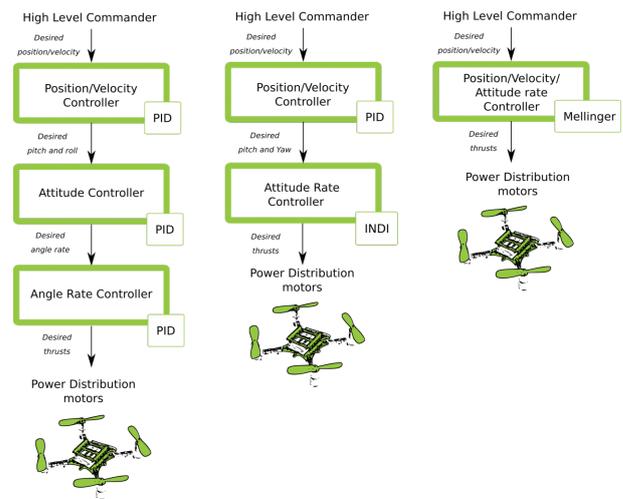


Figura 10: Control por niveles

## 6. Conclusión

La incorporación de tecnologías avanzadas en los drones CF ha resultado ser una ayuda fundamental para el progreso en la experimentación en el campo de la Automática. Este análisis realizado en este artículo no solo ha analizado los aspectos técnicos, sino que también ha resaltado aplicaciones innovadoras, vislumbrando una perspectiva de los posibles avances en este dinámico campo. Entre las aplicaciones más destacadas se encuentran la optimización de la estabilidad y maniobrabilidad de los drones a través de controladores PID, la precisión en el posicionamiento gracias a sistemas como LPS y LoPS, y la utilización de técnicas avanzadas de captura de movimiento para la navegación en interiores como MCP.

En el ámbito de la investigación, los CF emergen como una herramienta versátil y accesible, facilitando el desarrollo de operaciones basadas en el control y la optimización. Debido a sus módulos los CF permiten una fácil incorporación de sensores y módulos adicionales, lo que abre un abanico de posibilidades para aplicaciones personalizadas en diversas áreas.

Mirando hacia el futuro, las perspectivas para esta tecnología son extremadamente prometedoras. Sin embargo, se deben abordar varios desafíos importantes para maximizar su potencial. La mejora de la eficiencia energética y la autonomía

de vuelo mediante el desarrollo de baterías más avanzadas es un área crítica de investigación. Además, la implementación de algoritmos más sofisticados de Inteligencia Artificial (IA) y Aprendizaje Automático pueden potenciar aún más las capacidades autónomas de los CF como plataforma de investigación.

No obstante, el avance de esta tecnología también debe considerar aspectos éticos, regulatorios y de privacidad. La creación de marcos normativos claros y robustos será esencial para asegurar que el uso de drones en aplicaciones automáticas se desarrolle de manera responsable y sostenible.

## Agradecimientos

Los autores han contado con el apoyo de la Fundación Vitoria-Gasteiz Mobility Lab, organismo gubernamental de la Diputación Foral de Araba y el Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz, en el marco de la siguiente subvención de proyecto: "Transporte colaborativo de mercancías".

## Referencias

- Avadhanula, R., 2023. Cooperative collision avoidance on small-sized quadcopters with indoor loco positioning system.
- Bitcraze, 2024a. Controllers in the Crazyflie. <https://www.bitcraze.io/documentation/repository/crazyflie-firmware/master/functional-areas/sensor-to-control/controllers/>, retrieved: 2024-05-25.
- Bitcraze, 2024b. CrazyFlie Expansion Decks. <https://www.bitcraze.io/documentation/tutorials/getting-started-with-expansion-decks/>, retrieved: 2024-05-25.
- Bitcraze, 2024c. Datasheet Crazyflie 2.1. <https://www.bitcraze.io/products/crazyflie-2-1/>, retrieved: 2024-05-25.
- Bitcraze, 2024d. Getting started with the Crazyflie 2.X. <https://www.bitcraze.io/documentation/tutorials/getting-started-with-crazyflie-2-x/>, retrieved: 2024-05-25.
- Bitcraze, 2024e. Getting started with the Loco Positioning System. <https://www.bitcraze.io/documentation/tutorials/getting-started-with-loco-positioning-system/>, retrieved: 2024-05-25.
- Bitcraze, 2024f. Lighthouse Positioning System. <https://www.bitcraze.io/documentation/system/positioning/lighthouse-positioning-system/>, retrieved: 2024-05-25.
- Bitcraze, 2024g. Loco Positioning system. <https://www.bitcraze.io/documentation/system/positioning/loco-positioning-system/>, retrieved: 2024-05-25.
- Bitcraze, 2024h. Motion Capture Positioning. <https://www.bitcraze.io/documentation/system/positioning/mocap-positioning/>, retrieved: 2024-05-25.
- Bitcraze, 2024i. Positioning Systems Overview. <https://www.bitcraze.io/documentation/system/positioning/>, retrieved: 2024-05-25.
- Chu, T. S., Chua, A., Sybingco, E., Roque, M. A., 2022. A performance analysis on drone loco positioning system for two-way ranging protocol. *ASEAN Engineering Journal* 12 (3), 95–102. DOI: 10.11113/aej.v12.17487
- Fernando, M., Liu, L., 2019. Formation control and navigation of a quadrotor swarm. In: 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, pp. 284–291. DOI: 10.1109/ICUAS.2019.8798352
- Giernacki, W., Skwierczyński, M., Witwicki, W., Wroński, P., Koziński, P., 2017. Crazyflie 2.0 quadrotor as a platform for research and education in robotics and control engineering. In: 2017 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). IEEE, pp. 37–42.
- Gün, A., 2023. Attitude control of a quadrotor using pid controller based on differential evolution algorithm. *Expert Systems with Applications* 229, 120518. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.120518
- Jong-Hwan, B., Myeong-Suk, P., Sang-Hoon, K., 2017. Design of docking drone system using p-pid flight controller. *Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing* 421, 768–773. DOI: 10.1007/978-981-10-3023-9\_18
- Kilberg, B. G., Campos, F. M. R., Schindler, C. B., Pister, K. S. J., JUL 2020. Quadrotor-based lighthouse localization with time-synchronized wireless sensor nodes and bearing-only measurements. *Sensors* 20 (14), 3888. DOI: 10.3390/s20143888
- Leong, X. W., Hesse, H., 2019. Vision-based navigation for control of micro aerial vehicles. *Proceedings of the 4th Irc Conference on Science, Engineering and Technology, Irc-Set 2018*, 413–427. DOI: 10.1007/978-981-32-9828-6\_33
- Naranjo, M., Fuentes, D., Muelas, E., Diez, E., Ciruelo, L., Alonso, C., Abenza, E., Gomez-Espinosa, R., Luengo, I., FEB 2023. Object detection-based system for traffic signs on drone-captured images. *Drones* 7 (2), 112. DOI: 10.3390/drones7020112
- Neumann, P. P., Hirschberger, P., Baurzhan, Z., Tiebe, C., Hofmann, M., Huellmann, D., Bartholmai, M., 2019. Indoor air quality monitoring using flying nanobots: Design and experimental study. 2019 Ieee International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (Isoen 2019), 1–3.
- Noordin, A., Mohd Basri, M. A., Mohamed, Z., 2023. Real-time implementation of an adaptive pid controller for the quadrotor mav embedded flight control system. *Aerospace* 10 (1), 59. DOI: 10.3390/aerospace10010059
- Pichierri, L., Testa, A., Notarstefano, G., AUG 2023. Crazychoir: Flying swarms of crazyflie quadrotors in ros 2. *Ieee Robotics and Automation Letters* 8 (8), 4713–4720.
- Preiss, J. A., Honig, W., Sukhatme, G. S., Ayanian, N., 2017. Crazyswarm: A large nano-quadcopter swarm. In: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, pp. 3299–3304. DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989376
- Punpigit, N., Thammawichai, M., 2019. A flight formation control of a micro aerial vehicle swarm using a motion capture. In: 2019 16th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). IEEE, pp. 128–131. DOI: 10.1109/ECTI-CON47248.2019.8955148
- Puri, V., Nayyar, A., Raja, L., 2017. Agriculture drones: A modern breakthrough in precision agriculture. *Journal of Statistics Management Systems* 20 (4), 507–518. DOI: 10.1080/09720510.2017.1395171
- Sun, J.-h., Cheng, L. L., 2017. Robust pid controller for ar drone. *Computer Science and Technology (Cst2016)*, 1213–1221.
- Xin, C., Zhang, W., Yang, Q., 2020. Research and application prospect of pid auto-tuning. *Proceedings of the 39th Chinese Control Conference*, 5991–5995. DOI: 10.23919/ccc50068.2020.9188615
- Zekry, O. H., Ashry, M., Hafez, A., Attia, T., 2024. Integral-backstepping for crazyflie quadrotor trajectory tracking control. *AIAA SCITECH 2024 Forum*, 1710; 1710–1710.
- Zekry, O. H., Attia, T., Hafez, A. T., Ashry, M. M., 2023. Pid trajectory tracking control of crazyflie nanoquadcopter based on genetic algorithm. In: 2023 IEEE Aerospace Conference. IEEE, pp. 1–8. DOI: 10.1109/AER055745.2023.10115538