

Utilización de un cuadricóptero para mejorar la vigilancia aérea mediante control Lyapunov

Use of a quadcopter to improve aerial surveillance using Lyapunov control

Jefferson Rafael Centeno-Alcívar

jefferson.centeno@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6039-9517>

Universidad Técnica Luis Vargas Torres
de Esmeraldas, Ecuador

Exequiel Wilmer Reyes-Contreras

exequiel.reyes@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-0459-9271>

Universidad Técnica Luis Vargas Torres
de Esmeraldas, Ecuador

Ismael Elías Erazo-Velasco

eduardo.cruz@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-7647-4611>

Universidad Técnica Luis Vargas Torres de
Esmeraldas, Ecuador

Byron Fernando Chere-Quiñónez

byron.chere@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1886-6147>

Universidad Técnica Luis Vargas Torres de
Esmeraldas, Ecuador

RESUMEN

En el presente artículo se realizó la construcción de un prototipo de programación y robótica, concretizando, un cuadricóptero de operación en tiempo real con mapeo, con la finalidad de realizar tareas de forma automática y programada en el área de la vigilancia y seguridad de espacios. Este trabajo describe el diseño matemático del prototipo para su control remoto y el diseño de construcción, de igual forma se aplicaron herramientas tecnológicas como MATLAB incluyendo simulaciones en Python, quedando conformado por dos grandes bloques: hardware y software. El prototipo es construido a escala, mediante una estructura que contiene un microcontrolador, la cual, podrá desplazarse con las órdenes que el operador del cuadricóptero envíe o de manera automática, gracias a la creación de un algoritmo inteligente basados en la función Lyapunov, dando un control más preciso al mismo, y de tal forma evite las colisiones con objetos. El mismo también tiene como finalidad generar un impacto tecnológico e innovador, y de esta forma contribuir al desarrollo de nuevas ciencias y avances dentro de nuestra sociedad, invitando a la comunidad a incursionar en la elaboración de nuevos proyectos de esta índole ampliando su percepción y captación de intereses en la ciencia.

Palabras claves: Cuadricóptero, Lyapunov, MATLAB, UAV, Vigilancia Aérea.

ABSTRACT

In this article, the construction of a programming and robotics prototype was carried out, concretizing, a real-time operation quadcopter with mapping, in order to perform tasks automatically and programmed in the area of surveillance and space security. This work describes the mathematical design of the prototype for its remote control and the construction design, in the same way technological tools such as MATLAB were applied, including simulations in Python, being made up of two large blocks: hardware and software. The prototype is built to scale, through a structure that contains a microcontroller, which can move with the orders that the quadcopter operator sends or automatically, thanks to the creation of an intelligent algorithm based on the Lyapunov function, giving a more precise control to it, and thus avoid collisions with objects. It also aims to generate a technological and innovative impact, and in this way contribute to the development of new sciences and advances within our society, inviting the community to venture into the development of new projects of this nature, expanding their perception and uptake. of interests in science.

Keywords: Quadcopter, Lyapunov, MATLAB, UAV, Aerial Surveillance.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la tecnología ha evolucionado, el uso de drones ha crecido exponencialmente y en el mercado se pueden encontrar cada vez más cantidad de estos prototipos, en un inicio se utilizaron con fines principalmente militares, pero en la actualidad se utilizan en funciones civiles como monitoreo de áreas, gestión de riesgos, vigilancia privada, agricultura, topología, etc (Rejado et al., 2016).

La vigilancia tradicional debe de ser mejorada mediante un sistema de video vigilancia utilizando vehículos aéreos no tripulados ya que el índice de robos ha incrementado exponencialmente en los últimos años del 2020-2023, y el sistema denominado ojo de águila del ECU911 presenta puntos ciegos donde no abarca todos los ángulos existentes, lo cual ha llevado a implementar nuevas técnicas para el uso de vigilancia (Rosaldó et al., 2017). El cuadricóptero como herramienta de video vigilancia es un mecanismo que permite dar un mapeo de una zona determinada en tiempo real. Desafortunadamente, tiene una capacidad de vuelo muy limitada debido al abrumador consumo de energía de los motores. Pero el problema más relevante radica en la no linealidad y la inestabilidad, las características inherentes a su naturaleza que dificultan en gran medida su modelado y posteriormente el control (Raffo et al., 2010, p. 29-39). Por ende, para mantener una estabilidad se requiere de un controlador que constituye el elemento fundamental en un sistema de control, puesto que establece el comportamiento de un sistema que responde a señales de entrada y salida o procedimiento del lazo de control, ya que condiciona la acción del elemento actuador en función del error obtenido. La forma en la cual el regulador genera la señal de control se denomina acción de control, algunas de estas acciones se conocen como acciones básicas de control, mientras que otras se pueden presentar como combinaciones de las acciones básicas (Morales, 2018).

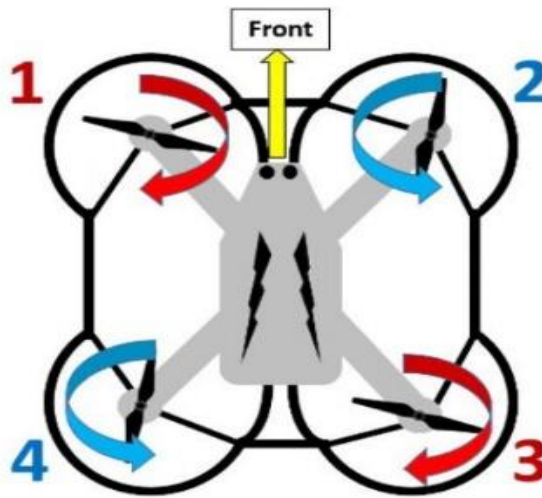
El diseño y simulación de un controlador basado en Lyapunov que permita el manejo del cuadrimotor disponible en el UAV Toolbox de Simulink, con la finalidad de realizar patrullajes constantes en áreas determinadas. Para esto, se requiere controlar tanto la posición como la orientación de dirección del dron, dando autonomía al sistema para realizar patrullaje

repetitivos, estables y combinados (Valenzuela 2022). No obstante, el modelado matemático conlleva a la precisión del estado de libertad que tiene el cuadricóptero para que el proceso de patrullaje por sector sea estable y seguro realizando bucles de tiempo en distintos sitios.

BASE TEÓRICA

El cuadricóptero, es un dron que integra cuatro brazos y en la parte final de cada brazo un motor y una hélice, cabe mencionar que los giros de los motores no son igual, dos giran en sentido horario y los otros dos giran en sentido antihorario, de esta forma se consigue romper la inercia logrando una fuerza de empuje necesaria para elevarse, se usará las velocidades angulares de cada una de estas hélices para controlar la posición del dron y tener una estabilidad, como se puede observar en la Figura 1, la cual ilustra el sentido de giro determinado por los motores (Devopedia., 2022).

Figura 1. Sentido y giro de las hélices impulsadas por los motores para la estabilidad de vuelo del prototipo.



Fuente: <https://devopedia.org/quadcopter>

La estabilidad es un aspecto importante en cualquier sistema de aeronave tripulada o no tripulada, puesto que determina la capacidad de la misma para eliminar las perturbaciones que le sacan de la posición de equilibrio. El requisito de estabilidad para la aeronave es la distribución de la masa, es decir, las mismas hélices al girar a diferentes sentidos, estas, deben estar a la misma distancia con el mismo peso y tamaño para lograr una posición del centro de gravedad adecuada. Para cada problema se considerará un modelo de fuerzas y momentos que dará lugar a un sistema de ecuaciones lineal de donde se extraerán las condiciones de equilibrio: ángulo de ataque, de balanceo, de resbalamiento, deflexiones de las superficies de control, etc. Para ello será necesario estimar las derivadas de estabilidad y de control, que representan el cambio en las fuerzas y momentos aerodinámicos ante cambios en las variables de estado y de control respectivamente. Esta estimación se realizará mediante el programa Tornado, codificado en MATLAB (Rivero, 2010).

Los grados de libertad del cuadricóptero, es el movimiento que tendrá seis grados de independencia en un espacio tridimensional, lo cual tiene la capacidad de moverse hacia delante, atrás, arriba, abajo, izquierda, derecha, es decir, tendrá una traslación en tres ejes perpendiculares, combinados con la rotación sobre tres ejes perpendiculares, la cual podrá moverse libremente en los tres ejes y podrá girar libremente sobre estos, haciendo maniobras con los 6 grados de libertad. El giro sobre el eje X lo llamaremos roll (ϕ), el giro sobre el eje Y lo llamaremos pitch (θ) y finalmente, el giro sobre el eje Z, Yaw (ψ) (Parra Ballesteros, 2020).

Este patrón relacionara las fuerzas y momentos en los distintos ejes con características del dron como la masa, variables de posición del cuadricóptero y las variables de acción sobre los distintos ejes y el empuje vertical. Las cuatro entradas del modelo serán las variables de acción sobre Roll, Pitch y Yaw y el empuje vertical. Las salidas serán las aceleraciones y aceleraciones angulares sobre los tres ejes cardinales como se muestra en la siguiente ecuación (Parra, 2020).

$$m\ddot{x} = -u_z \sin\theta$$

$$m\ddot{y} = u_z \cos\theta \sin\phi$$

$$m\ddot{z} = u_z \cos\theta \cos\phi$$

$$I_x \ddot{\phi} = \tau_\phi$$

$$I_Y \ddot{\theta} = \tau_\theta$$

$$I_z \ddot{\psi} = \tau_\psi$$

Asumiendo que los giros en los tres ejes serán pequeños se puede aceptar la siguiente aproximación sin grandes errores:

$$u_z \approx mg$$

$$\text{sen}\alpha \approx \alpha$$

$$\text{cos}\alpha \approx 1$$

Quedando el modelo reducido de la siguiente forma:

$$m\ddot{x} = -mg\theta$$

$$m\ddot{y} = mg\phi$$

$$m\ddot{z} = u_z - mg$$

$$I_x \ddot{\phi} = \tau_\phi$$

$$I_Y \ddot{\theta} = \tau_\theta$$

$$I_z \ddot{\psi} = \tau_\psi$$

A través de sus entradas $(u_z, \tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi)$ modifica la altura del cuadricóptero a través de la integración de la aceleración en ese eje (z) y los ángulos de giro a través de la integración de sus aceleraciones angulares (ϕ, θ, ψ) . Este modelo necesita de la retroalimentación de los ángulos $(\phi$ y $\theta)$ que modificaran los incrementos en los ejes cardinales afectando a la posición del cuadricóptero (Parra, 2020).

Utilizando un control Lyapunov, que es una técnica utilizada en teorías de control para diseñar sistemas estables, evaluando la estabilidad del sistema dinámico, determinando si el sistema es constante o asintóticamente constante sin requerir la resolución de ecuaciones (Ochoa, 2009). Dicho método indica que, si la energía de un sistema es disipada de manera continua, el sistema termina convergiendo hacia un punto de equilibrio. No obstante, las funciones de Lyapunov demuestran la estabilidad de cierto punto fijo en un sistema dinámico o en las ecuaciones diferenciales autónomas (Bermejo & Rodríguez, 2013).

El objetivo del control Lyapunov es definir una función $f(x)$ que sea de carácter positiva, teniendo derivadas parciales continuas y su derivada a través de una trayectoria de estado sea $\dot{f} \leq 0$, ya que no existe un método para hallar una función, se propone una función candidata y probar si cumple las condiciones de estabilidad donde "x" sea un punto de equilibrio del sistema $(\dot{x}=f(x))$ y sea $V=D \rightarrow$ un campo escalar continuamente diferenciable en un dominio que contiene el origen entonces, si $f(x)$ es definido positivamente y $\dot{f}(x)$ es semidefinida negativamente el origen de un punto es estable, lo cual pasa si un punto se define negativamente se dice que el origen de un punto de equilibrio es asintóticamente estable, el control Lyapunov propone un sistema inestable $\dot{x}=x+u$ indicando que $\dot{x}=x$ es el sistema inestable y "u" es una variable de control.

Tomando la variable de error $e = x - x_{ref} + u$ donde "x" tienda a un determinado valor de referencia, la variable de control "u" se define utilizando una función del control Lyapunov, teniendo ciertas características para asegurar una estabilidad como se muestra en la siguiente ecuación:

$$v(x) \geq 0, \quad \forall x$$

$$v'(x) = \frac{dv}{dt} < 0, \quad \forall x$$

Por lo tanto, se propone la siguiente función:

$$V = \frac{1}{2} e^2$$

La misma que cuenta con una derivada parcial como muestra la siguiente ecuación:

$$\frac{du}{dt} = e \cdot \dot{e} = e \cdot (e + x_{ref} + u) = e^2 + e \cdot (x_{ref} + u)$$

Se determina la variable "u" tal que se cumpla $\dot{v} < 0$

$$e \cdot (x_{ref} + u) = -k \cdot e^2$$

$$u = -k \cdot e - x_{ref}$$

Remplazando la ecuacion de derivada parcial, se acota el valor de "k", de la siguiente manera como lo expresa la ecuacion posterior:

$$e^2 + e \cdot (x_{ref} - k \cdot e - x_{ref}) \leq 0$$

$$e^2 - k \cdot e^2 \leq 0$$

$$k \geq 1$$

El modelo matemático de un sistema dinámico equivale a una ecuación matemática, que representan el movimiento del sistema con exactitud o lo más cercano posible. Con base en las cuales se puede conocer el comportamiento del sistema mediante variables, las cuales representan los valores físicos del sistema y así realizar una simulación, la cual ayuda a predecir el sistema al momento de realizar un modelo (Ogata, 2003).

Por lo tanto, si tenemos la variable α como una variable de posición genérica, se obtiene la siguiente ecuación del modelo cinemático:

$$F_{\alpha} = m \cdot a_{\alpha}$$

A partir de la ecuación anterior, se pretende encontrar una ecuación en función de la posición, no obstante, se muestra el siguiente artificio matemático, para encontrar la ecuación a utilizar.

$$\frac{F_{\alpha}}{m} = \frac{dv_{\alpha}}{dt} \cdot \frac{d\alpha}{d\alpha}$$

$$\frac{F_{\alpha}}{m} = v_{\alpha} \cdot \frac{dv_{\alpha}}{d\alpha}$$

Efectuando una integral en ambos lados de la ecuación obtendremos el siguiente resultado:

$$\frac{v_{\alpha}^2}{2} = \frac{F_{\alpha}}{m} \alpha ; v_{\alpha} = \alpha$$

$$\alpha^2 = \frac{2 \cdot F_{\alpha}}{m} \cdot \alpha$$

$$\alpha^2 = \frac{2 \cdot F_{\alpha}}{m} \cdot \alpha$$

$$\alpha^2 = K \cdot \alpha$$

Siendo K es una constante, sin embargo, la ecuación describe el movimiento en función de la posición, es una ecuación inestable, por lo cual, se realiza unas operaciones en conjunto a conjugadas y operaciones cumpliendo condiciones establecidas.

$$e = \alpha - \alpha_{ref}$$

$$\dot{\alpha} = \dot{e}$$

En la siguiente ecuación se propone la función pretendiente de Lyapunov que cumple la primera condición de estabilidad descrita.

$$v(\alpha) = \frac{1}{2}e^2$$

La derivada temporal es:

$$v(\alpha) = e \cdot \dot{e} = (\alpha - \alpha_{ref}) \cdot \dot{\alpha}$$

Obteniendo como resultado la siguiente ecuación:

$$\dot{\alpha} = \sqrt{k} \cdot \alpha$$

En la ecuación anterior existe la posibilidad de tener dos resultados, uno positivo y uno negativo, siendo $\dot{\alpha}$ igual a la raíz cuadrada de una constante, donde es directamente proporcional a la posición de la partícula. Por ende, al reemplazar las ecuaciones no se podría determinar una expresión, tal que se cumpla la segunda condición de estabilidad de Lyapunov.

Para lograr un control basado en Lyapunov, al modelo matemático específico se realiza un artificio matemático, separando la ecuación de segundo grado en dos secciones como se muestra a continuación:

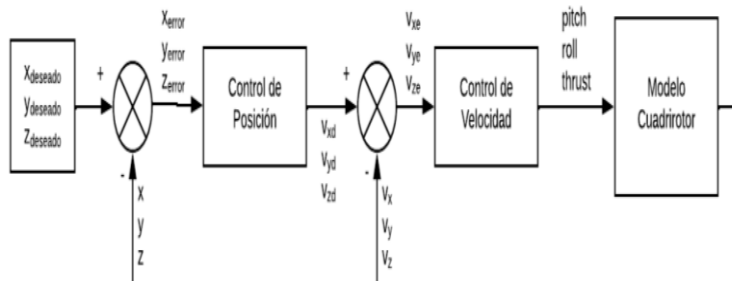
$$K1 = \frac{\alpha}{\dot{\alpha}} = K2 \cdot \dot{\alpha}$$

$$\alpha = K1 \cdot \dot{\alpha}$$

$$k1 = k2 \cdot \dot{\alpha}$$

El resultado obtenido son dos subsistemas con dos leyes de control, que buscan relacionar posición, con velocidad y con la acción final de control del modelo, sin embargo, en la Figura 2 se puede observar de manera general un diagrama que muestra la forma en que se implementa este control.

Figura 2. Diagrama de control basado en Lyapunov (Ogata, 2003).



Con la finalidad de aumentar la comprensión, en la Tabla 1, se muestra el acrónimo de terminos utilizados en las ecuaciones donde se describen las variables y constantes del modelo dinámico.

Tabla 1. Variables y constantes del modelo dinámico.

Variable	Descripción	Unidad
\ddot{x}	Aceleracion en el eje X	m/s^2
\ddot{y}	Aceleracion en el eje Y	m/s^2
\ddot{z}	Aceleracion en el eje Z	m/s^2
ϕ	Angulo Roll	Rad
θ	Angulo Pitch	Rad
$\ddot{\phi}$	Aceleracion angular Roll	Rad/s^2

$\ddot{\theta}$	Aceleración angular Pitch	Rad/s^2
$\ddot{\psi}$	Aceleración angular Yaw	Rad/s^2
u_z	Variable de acción eje Z	N
m	Masa del quadrotor	Kg
g	Constante de gravedad	m/s^2
I_x	Inercia en el eje X	kgm^2
I_y	Inercia en el eje Y	kgm^2
I_z	Inercia en el eje Z	kgm^2

MÉTODOS Y MATERIALES

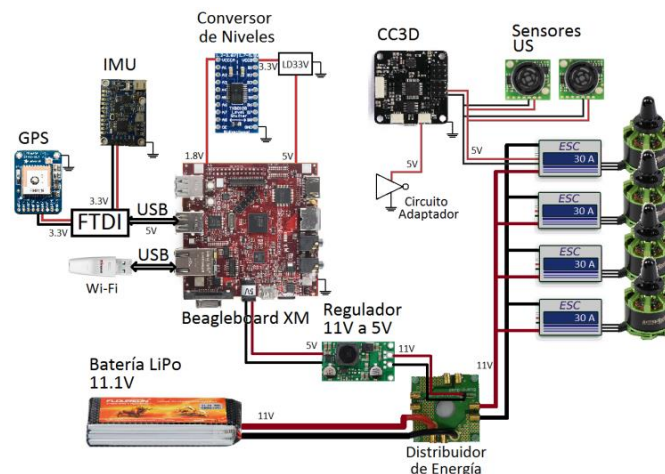
Primero, fue necesario realizar una compilación de datos de carácter cualitativo asociados con la observación, así como la información sobre la descripción, cualidades y la conducta de un cuadricóptero en diferentes situaciones.

En base a la información requerida se efectuó un análisis cuantitativo con la finalidad de evaluar la estabilidad, precisión y adaptabilidad del cuadricóptero controlado por Lyapunov en diferentes escenarios de vigilancia, esto implica mediciones numéricas de variables como la estabilidad del vuelo, la precisión de seguimiento de objetos, el seguimiento de sistema de control y la autonomía del mismo.

Otro factor clave para lograr el desarrollo del prototipo es el diseño del sistema, la cual, es vital plantear las condiciones básicas que necesita tener el cuadricóptero y a su vez especificar las tareas que el mismo debe cumplir en la vigilancia, además de la identificación de los componentes necesarios del sistema, incluyendo el cuadricóptero, los sensores, controladores y la compatibilidad de las herramientas computacionales.

Simultáneamente se debe de realizar la configuración del hardware, que en este caso es la tarjeta microcontroladora Arduino uno, está, controlará el cuadricóptero según la programación efectuada en el software Arduino. Posteriormente se debe conectar y ensamblar los componentes del cuadricóptero, incluyendo motores, controladores de velocidad, los sensores, los componentes de comunicación inalámbrica y la cámara para la vigilancia, como se muestra en la Figura 3. Además, se debe realizar las conexiones adecuadas entre el Arduino uno y los componentes del cuadricóptero, para ello, se realizó, una simulación en la plataforma online Autodesk TinkerCad, en donde se verificó el correcto funcionamiento del prototipo.

Fig. 3. Esquema general del cuadricóptero (Berrutti, et al. 2015).



En cuanto a la programación del microcontrolador, se utiliza el lenguaje de programación Arduino en el software que proporciona el mismo, la cual, se basa en dictar variables y funciones necesarias para el funcionamiento del prototipo aéreo, una vez concluida la programación se la carga en el hardware del microcontrolador para que éste la ejecute a base de condicionantes y bucles, de igual forma, se logra desarrollar un algoritmo de control Lyapunov para lograr la estabilidad y precisión del vuelo, delimitando, los espacios y tiempos de vuelo en 3 dimensiones, para ello, se implementa una lógica de control que permita el seguimiento de objetos y las maniobras requeridas para la vigilancia aérea. En caso se presente la

necesidad de controlar el cuadricóptero de forma manual, se implementó en el ensamblaje del prototipo un módulo de radio frecuencia para mantener la comunicación inalámbrica con la sala de vigilancia y a su vez con el control remoto del mismo, el módulo es compatible con el microcontrolador y fue declarado en la programación para que ejecute las acciones asignadas.

De la misma forma, se debe de integrar las herramientas computacionales con el cuadricóptero mediante un cable USB, primeramente se utiliza MATLAB para ejecutar un análisis minucioso y el diseño iterativo del sistema de control Lyapunov, para ello, se debe implementar las funciones o algoritmos específicos en Python para el procesamiento de imágenes y reconocimiento de objetos en tiempo real, posteriormente, se integran los componentes de software, como el controlador del cuadricóptero y los algoritmos de procesamiento de imágenes para lograr una vigilancia eficiente.

Para finalizar se realizan las pruebas en una zona controlada, estipulado en MATLAB mediante el control Lyapunov para verificar el correcto funcionamiento y evaluar la estabilidad, precisión y adaptabilidad del cuadricóptero controlado por Lyapunov en diferentes escenarios de vigilancia. Por último, se realizan los ajustes y mejoras en el hardware según los resultados de las pruebas hechas anteriormente y si se quisiera cambiar el área de vuelo solamente se ubican las nuevas coordenadas (x, y, z) en MATLAB y se carga la nueva información al cuadricóptero.

Por otro lado, para hacer posible la construcción de este prototipo se hizo uso de algunos materiales extras mostrados en la Tabla 2:

Tabla 2. Otros recursos

Materiales	
Software	MATLAB
	Python
	Autodesk TinkerCad
	Chasis
	Tarjeta Motor Shield
	Motor Brushless A2212
	Controladores de Velocidad
	Batería Tipo LiPo
	Leds
	Hardware y Otros Recursos
Sensor Infrarrojo	
Cable USB	
Cámara	
Computadora Portátil	
Juego de Destornilladores	
Amarras	
Pistola de silicona	
Barras de siliconas	

En cuanto a los cuadricópteros, estos son una herramienta versátil para la vigilancia aérea y pueden ofrecernos muchas ventajas, como la capacidad de recorrer aéreas de difíciles accesos, como tejados, espacios reducidos o terrenos accidentados, lo que permite alcanzar lugares donde otros sistemas de vigilancia pueden tener limitaciones. Además, se aborda su habilidad para realizar vuelos estacionarios, lo que resulta especialmente útil para obtener imágenes estables y detalladas desde el aire durante la vigilancia.

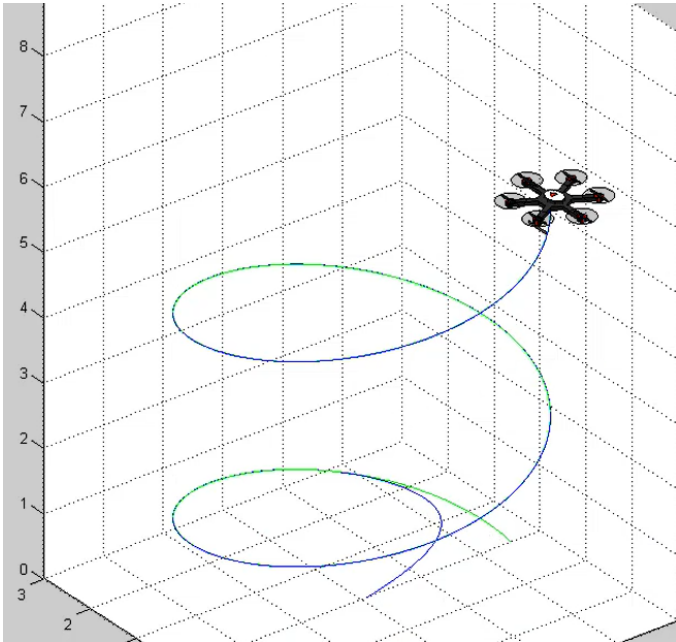
Control Lyapunov: Un Enfoque Robusto para el Control de Cuadricópteros

En esta sección se proporciona una descripción detallada del control Lyapunov y como se aplica a los sistemas dinámicos, centrándose específicamente en su aplicación al control de cuadricópteros.

El control Lyapunov se basa en la teoría del control no lineal y se utiliza para diseñar leyes de control que garanticen la estabilidad de los sistemas dinámicos, como puede ser el vuelo del cuadricóptero. Su objetivo principal es mantener el sistema en un estado deseado, teniendo en cuenta las perturbaciones y las variaciones del entorno, para ello, se utiliza la función de Lyapunov, que es una función escalar que mide la energía potencial del sistema y su tasa de cambio en el tiempo. Esta función se utiliza para evaluar la estabilidad del sistema y diseñar una ley de control adecuada.

Con respecto a los cuadricópteros, este posee 6 grados de libertad que le permiten moverse en el espacio tridimensional de manera independiente y el control Lyapunov sirve para regular y estabilizar estos 6 grados de libertad, generando un vuelo seguro y preciso. En la Figura 4, se muestra el recorrido del cuadricóptero en un espacio tridimensional, este recorrido puede ser modificado según la programación en MATLAB

Figura 4. Recorrido del cuadricóptero en un plano tridimensional.



En cuanto a la función Lyapunov, esta se diseña de tal manera que se obtenga una positiva definida y tenga una derivada negativa definida, lo que significa que la función disminuirá continuamente a medida que el sistema se acerque a un estado deseado, garantizando la estabilidad. En el caso del cuadricóptero, la función estará diseñada para tener en cuenta los grados de libertad mencionados anteriormente, considerando variables como la posición, la velocidad y la orientación del cuadricóptero.

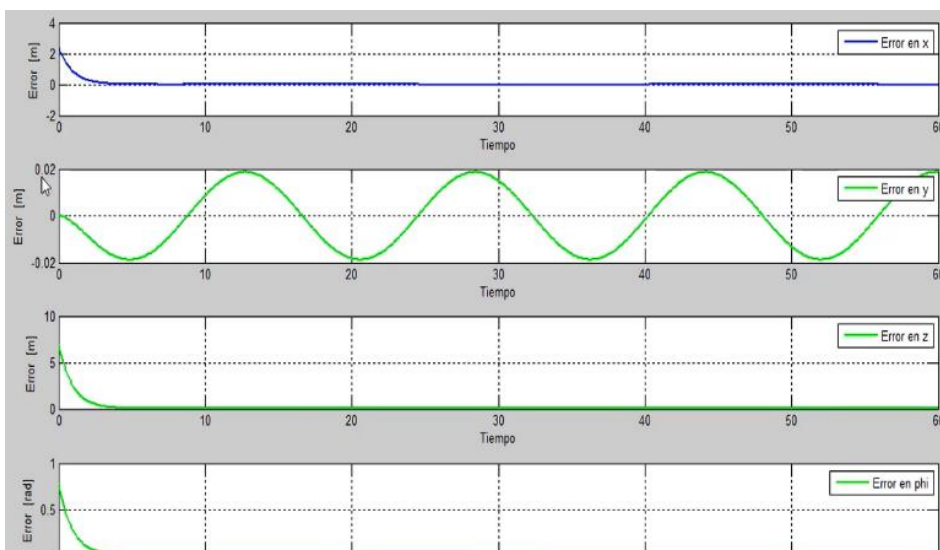
Mediante la función de Lyapunov se diseñan algoritmos de control que ajustan los parámetros del cuadricóptero en tiempo real, teniendo en cuenta las condiciones de vuelo y las perturbaciones externas, los algoritmos generan comandos de control óptimos para mantener la estabilidad y lograr los movimientos deseados en cada uno de los grados de libertad.

En comparación con otros enfoques de control, el control Lyapunov ofrece una mayor robustez y estabilidad, su diseño se basa en principios matemáticos sólidos y se respalda por teoremas que garantizan la estabilidad del sistema, además, es compatible con la teoría de control adaptativo, lo que permite una adaptabilidad continua a medida que el sistema evoluciona.

RESULTADOS

Durante el proceso de diseño y elaboración del prototipo se presentaron diversos escenarios en varias etapas, sin embargo, el resultado que pudimos obtener tras el método de prueba y error que nos brinda MATLAB mediante gráficas, como muestra la Figura 5, en donde se denota el margen de error en los ejes (x, y, z, phi), el mismo fue de gran ayuda para que la modelación y simulación salga de acuerdo a todos los parámetros de pruebas previstos.

Figura 5. Margen de error en (x, y, z, phi).



Se evidencia que el control Lyapunov es capaz de garantizar la estabilidad del sistema de vigilancia mediante cuadricópteros, incluso en presencia de perturbaciones o incertidumbres, gracias a que su diseño permite evaluar la estabilidad de forma sistemática y generar comandos de control que contrarresten las perturbaciones y mantengan el sistema en un estado deseado. Además, se denota que la vigilancia aérea mediante el control Lyapunov es altamente adaptable, lo que significa que puede ajustarse de forma dinámica a cambios en el entorno o en las condiciones de vuelo, permitiendo al cuadricóptero responder de manera efectiva.

El control Lyapunov habilita al cuadricóptero para realizar maniobras ágiles y rápidas, lo que resulta en una cobertura más amplia y eficiente durante las operaciones de vigilancia aérea, gracias a la indexación de algoritmos de control se pueden ejecutar cambios rápidos de dirección, giros y cambios de altitud. Esto permite alcanzar rápidamente áreas de interés y cubrir una mayor superficie en menos tiempo. La capacidad de realizar maniobras rápidas y ágiles es beneficiosa en situaciones en las que se requiere un seguimiento o respuesta inmediata, haciendo la vigilancia aérea efectiva.

Mediante el uso de control Lyapunov, el cuadricóptero puede mantener una posición relativa constante con respecto a un objeto en movimiento, lo que facilita la persecución y monitoreo continuo, sin embargo, estos algoritmos permiten la planificación y ejecución de rutas de vuelos específicos para cumplir misiones de vigilancia, como la exploración de áreas designadas o el patrullaje de perímetros.

Por último, la utilidad del cuadricóptero puede abrirse aún más a otros campos, como los eventos deportivos y manifestaciones, de igual forma puede ser utilizados en operaciones de búsqueda y rescate, y si se le integra una cámara térmica y sensores de detección para la búsqueda de personas en condiciones adversas, como incendios, avalanchas o terrenos peligrosos, lo que brindaría al operador una visión más precisa y detallada del área, otra aplicación es la supervisión de infraestructura críticas, como plantas industriales, oleoductos o líneas eléctricas, convirtiéndose en una herramienta eficiente para la detección temprana de anomalías o daños.

CONSIDERACIONES FINALES

Este artículo describe el diseño y la implementación de un cuadricóptero controlados de manera remota o de forma autónoma, mediante la aplicación de herramientas computacionales como MATLAB y Python, incluyendo artificios matemáticos. El desarrollo del mismo se encuentra formado por dos grandes bloques: hardware y software. El prototipo del cuadricóptero, construido a escala mediante una estructura que contiene un microcontrolador, podrá desplazarse con las órdenes que el usuario envíe o de manera automática, gracias a la creación de un algoritmo de control de Lyapunov que evita las colisiones con objetos.

Este estudio demuestra ser método efectivo y confiable para mejorar la vigilancia aérea gracias a la combinación de un cuadricóptero controlado de forma automática por algoritmos Lyapunov. Con la ayuda de esta tecnología de punta, la vigilancia se puede llevar a cabo de manera más precisa, rápida y eficiente. Es probable que los cuadricópteros que utilizan el control de Lyapunov se utilicen más ampliamente en una variedad de aplicaciones de vigilancia aérea a medida que se desarrolla la tecnología.

Los algoritmos de control desarrollados permiten un seguimiento preciso de rutas predefinidas y una mayor precisión en la posición de orientación del cuadricóptero, esto asegura una recopilación de datos más confiable y precisa durante la vigilancia.

Para finalizar, se respalda la viabilidad y efectividad de utilizar cuadricópteros que funcionan mediante control Lyapunov en la vigilancia aérea, donde se destacan los beneficios obtenidos en términos de precisión, estabilidad de vuelo, adaptabilidad y eficiencia, estos, respaldan la relevancia y el potencial de esta tecnología en la mejora de la vigilancia aérea en diversos escenarios y aplicaciones.

RECOMENDACIONES

Como dato principal, se podrían realizar mejoras en la precisión del control, esto implica ajustar los parámetros del controlador Lyapunov, calibrar los sensores con mayor precisión y refinar los modelos matemáticos del cuadricópteros para mejorar un vuelo más estable y preciso, y a su vez, ampliar la capacidad de detención mediante la integración de sensores adicionales, como cámaras de mayor resolución, sensores infrarrojos de largas distancias, sistemas de reconocimiento facial, entre otros, esto permitirá una mejor identificación y seguimiento de personas u objetos durante la vigilancia.

En segundo lugar, es recomendable implementar un sistema de comunicación más avanzado para garantizar una comunicación fluida y confiable entre el cuadricóptero y la estación de control.

Por último, se sugiere capacitar de forma adecuada al personal operativo que utilizará el cuadricóptero en tareas de vigilancia, lo que incluye la familiarizarlos con el funcionamiento del mismo, los procedimientos de vuelo, el control Lyapunov y la interpretación de los datos recopilados durante las misiones

Durante el proceso de diseño y elaboración del prototipo se presentaron diversos escenarios en varias etapas, sin embargo, el resultado que pudimos obtener tras el método de prueba y error que nos brinda MATLAB mediante gráficas, como muestra la Figura 5, en donde se denota el margen de error en los ejes (x, y, z, phi), el mismo fue de gran ayuda para que la modelación y simulación salga de acuerdo a todos los parámetros de pruebas previstos.

CONCLUSIONES

Un sistema de videovigilancia en la FACI de la UTLVTE puede proporcionar una serie de beneficios importantes tanto para la seguridad como para el funcionamiento general de este lugar. Por ejemplo, mejora la seguridad del personal puesto que disuade a posibles delincuentes para que no cometan robos u otros actos vandálicos y proporciona una respuesta rápida en caso de incidentes ya que las grabaciones de video pueden proporcionar pruebas valiosas para identificar a los posible perpetradores y facilitar las investigaciones posteriores.

Con la mejora de la seguridad del lugar, también viene una sensación de tranquilidad que ayuda a mejorar la eficiencia del personal (estudiantes, profesores, etc.). En conclusión, un sistema de videovigilancia para la FACI siempre va a ofrecer una serie de ventajas que mejoran la gestión y eficiencia del personal que labora en este lugar.

En el presente artículo se han determinado lineamientos o criterios generales que permiten sentar las bases del diseño de un sistema de videovigilancia para la sala de profesores, el taller automotriz y el centro de cómputo de la FACI. A partir de estos criterios, se han identificado las especificaciones técnicas necesarias para los dispositivos principales requeridos, así como también la ubicación de los mismos en los sitios vigilados.

Vale la pena mencionar que en el artículo (Rueda-Panchano, 2023a) se abordan otros temas importantes relacionados con la implementación de este sistema de videovigilancia.

REFERENCIAS

- Dell. (2023). *Dell 22 Monitor: P2219H*. la.dell.com. Retrieved Ene 20 from <https://www1.la.dell.com/ec/es/dhs/Perif%C3%A9ricos-Dell/dell-p2219h-monitor/pd.aspx?refid=dell-p2219h-monitor&cs=ecdhs1&s=dhs>
- Erazo-Velasco, I. E. ., Bautista-Sánchez, J. V. ., Rodríguez-Jijón, R. I. ., González-Quiñonez, L. A. ., & Chere-Quiñonez, B. F. . (2022). Detection and classification of electrical faults in an electrical power system using the Wavelet transform and neural networks. *Sapientia: International Journal of Interdisciplinary Studies*, 3(7), 228–244. <https://doi.org/10.51798/sijis.v3i7.537>
- Hikvision. (2023a). *DS-2CD1053G0-I*. hikvision.com. Retrieved Ene 10 from <https://www.hikvision.com/my/products/IP-Products/Network-Cameras/Value-Series/DS-2CD1053G0-I/>
- Hikvision. (2023b). *DS-2CE56D0T-IRPF(C)*. hikvision.com. Retrieved Ene 10 from <https://www.hikvision.com/en/products/Turbo-HD-Products/Turbo-HD-Cameras/Value-Series/ds-2ce56d0t-irpf-c/>
- Hikvision. (2023c). *iDS-7216HQHI-M1/S*. hikvision.com. Retrieved Ene 20 from <https://www.hikvision.com/en/products/Turbo-HD-Products/DVR/AcuSense-Series/iDS-7216HQHI-M1-S/>
- Kruegle, H. (2007). *CCTV Surveillance: Analog and Digital Video Practices and Technology*. Elsevier Butterworth Heinemann. <https://books.google.com.ec/books?id=KJaNngEACAAJ>
- Lefranc, G. (2021, December). Some trends in robotics and automation. In *2021 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)* (pp. 1-8). IEEE.
- Mendoza, J., & Rueda, C. (2017). *Estudio para la Implementación de Cámaras de Videovigilancia en la Facultad de Ingenierías y Tecnologías* [Pregrado, Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas]. Ecuador.
- Monitor-Center. (2023). *Entérate de la Importancia del Almacenamiento Cloud en Cámaras de Seguridad*. Retrieved Apr 30 from <https://monitor-center.com/graba-en-la-nube-dvr-industria/>
- Rueda-Panchano, C. I. (2023a). Implementación de un Sistema de Videovigilancia para la FACI - UTLVTE. *Manuscript submitted for publication*.
- Rueda-Panchano, C. I. (2023b). Investigación sobre la Aplicación de la Automatización Residencial con el Objetivo de Reducir el Riesgo de Robo en una Vivienda Común. *Manuscript submitted for publication*.
- Tripp Lite. (2023). *UPS SmartPro LCD Interactive de 120V 1000VA 500W, AVR, Torre, USB, Protección TEL/DSL/Coaxial, 8 Tomacorrientes*. tripplite.eaton.com. Retrieved Ene 25 from <https://tripplite.eaton.com/smartpro-lcd-120v-1000va-500w-line-interactive-ups-avr-tower-usb-tel-dsl-coax-protection-8-outlets~SMART1000LCD>
- Villavicencio, G., & Rueda, C. (2017). *Diseño e Implementación de un Sistema de Videovigilancia, Monitorizado Teleméricamente en la Facultad de Ingenierías y Tecnologías* [Pregrado, Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas]. Ecuador.
- Wikipedia contributors. (2023a). *Archivo: Videovigilancia desde los centros de monitoreo*. wikipedia.com. Retrieved May 08 from https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Videovigilancia_desde_los_centros_de_monitoreo.jpg
- Wikipedia contributors. (2023b). *Grabador de Video Digital*. wikipedia.com. Retrieved Ene 25 from https://es.wikipedia.org/wiki/Grabador_de_video_digital