



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA OPCIÓN EN AUTOMATIZACIÓN

“SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA DE UN CUADRICÓPTERO EMPLEANDO RETROALIMENTACION VISUAL”

Tesis presentada para obtener el título de:
**MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA
ELECTRÓNICA OPCIÓN EN
AUTOMATIZACIÓN**

Presenta:

ING. PABLO VALENCIA BIBIAN*

Asesores de la Tesis:

Dra. Amparo Dora Palomino Merino, FCE-BUAP

Dra. Ma. Aurora D. Vargas Treviño, FCE-BUAP

PUEBLA, PUE. MEXICO

ENERO 2016



*** Becario VIEP-BUAP**

Resumen

Un vehículo aéreo no tripulado (UAV) es básicamente una aeronave con la capacidad de volar de forma autónoma empleando para ello un sistema de control, el cual puede estar dentro o fuera de la aeronave. El control utilizando Visual servoing aprovecha la información obtenida de una cámara, ésta información se retroalimenta obteniendo un ajuste buscando reducir la diferencia entre una posición deseada y la posición actual. La implementación de este sistema se ha hecho utilizando herramientas multiplataforma y software libre hasta donde fue posible de tal forma que en un proyecto futuro se pueda implementar el sistema dentro de la aeronave.

Abstract

An unmanned aerial vehicle (UAV) is basically an aircraft with the ability to fly autonomously employing a control system, which can be inside or outside of the aircraft. Control using Visual servoing uses the information obtained from a camera, this information is fed obtaining an adjustment looking to reduce the difference between a desired position and the current position. The implementation of this system has been using cross-platform tools and free software to where it was possible so that in the future project can implement the system within the aircraft.

Agradecimientos:

Le doy gracias a Dios por la vida y fuerza.
Gracias a mis padres por su apoyo incondicional.
Gracias a Karina por su confianza, apoyo y paciencia.
Gracias a la BUAP-FCE por la oportunidad.
Gracias a mis maestros por su tiempo, paciencia y enseñanzas.
Gracias a mis compañeros por su apoyo y ánimos mutuos para terminar.

Dedicatoria:

Esta tesis está dedicada a todas aquellas personas que quieren aprender un poco más.

Índice

Resumen.....	II
Abstract	III
Agradecimientos:	IV
Dedicatoria:	V
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Control	1
1.2 Historia de la aviación:	3
1.2.1 Vehículo aéreo no tripulado.....	4
1.3 Visual servoing	5
1.4 Estado del arte	6
1.5 Planteamiento del problema:	6
1.6 Objetivos.....	7
1.7 Justificación.....	8
1.8 Motivación	9
1.9 Propuesta para la solución del problema	9
1.9.1 Procesamiento de video	10
1.10 Estructura de la tesis	10
Capítulo 2 Fundamentos teóricos (Fundamentos Teóricos)	12
2.1 Aerodinámica.....	12
2.1.1 Principio de Bernoulli.....	12
2.1.2 Perfil Alar.....	13
2.2 Cuadricóptero	17
2.2.1 Modelo matemático del cuadricóptero.....	18
2.2.2 Orientación del helicóptero	19
2.2.3 Rotaciones.....	20
2.2.4 Modelo dinámico.....	22
2.3 Control	24
2.4 Visual servoing	24
Capítulo 3 Visual servoing	26
3.1 Imágenes:	27

3.2 Obtención de imágenes (sensores ópticos)	27
3.3 Transformaciones morfológicas.....	29
3.3.1 Erosión	29
3.3.2 dilatación.....	29
3.3.3 Morphological Gradient.....	30
3.3.4 Opening.....	30
3.4 Control por retroalimentación visual.	31
3.5 Criterios de configuración	31
3.6.1 Parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara:	36
Capítulo 4 Componentes mecánicos de un cuadricóptero	38
4.1 Estructura	38
4.2 Motores	39
4.3 ESC (controladores electrónicos de velocidad).....	40
4.4 Las hélices o palas	42
4.5 Batería	43
4.6 Control remoto	45
4.7 Placa controladora	46
4.8 Sistema de visión y retroalimentación con la computadora	47
4.9 Tarjeta capturadora de video	48
4.10 Telemetría.....	48
5 Capitulo Cuadricóptero Implementación.....	50
5.1 Hardware	50
5.1.1 Caracterización del cuadricóptero:	51
5.2 Pruebas realizadas con diferentes IMUS.....	54
5.3 Software	64
5.3.1 Proceso de calibración de la cámara	64
5.3 Sistema de visión para el procesamiento de las imágenes	66
5.5 Resultados	73
Capítulo 6 Conclusiones y trabajo futuro.....	75
6.1 Conclusiones Generales.....	75
6.2 Trabajo futuro	75
Bibliografía	77

Apéndices:	79
Apéndice 1 Herramientas matematicas.....	79
Apéndice 2 Datos de la estructura del cuadricóptero	79
Apéndice 3 hoja de datos motor brushless.....	81
Apéndice 4 Estabilizador de cámara	81
Apendice 5 Protocolo MAVlink.....	82
Apéndice 6 Requisitos de titulación.....	87

Capítulo 1 Introducción

1.1 Control

El control surge de la necesidad de poder mantener las máquinas dentro unos parámetros aceptables, esta necesidad se hizo evidente cuando en la revolución industrial las grandes maquinarias empezaban a fallar. En aquel entonces Maxwell presenta un trabajo dando un criterio de estabilidad la contribución de Maxwell estuvo en demostrar que el comportamiento de un sistema de control automático en la vecindad de una posición de equilibrio se podía aproximar por una ecuación diferencial y por lo tanto la estabilidad se podía discutir en términos de las raíces de la ecuación algebraica asociada. De esta manera Maxwell plantea estudiar la estabilidad de un sistema dinámico en función de la localización de las raíces de su ecuación característica, a partir de ese momento varios matemáticos se dieron a la tarea de resolver por diferentes métodos este problema por una parte Ruth propuso un criterio de estabilidad que lleva su nombre, Hurwitz lo resuelve empleando determinantes y Liapunov en 1889 presenta sus trabajos sobre estabilidad que sirven de base a la teoría de control moderna. Las bases ya estaban puestas aunque no hubo muchos avances notables hasta que en 1934 Nyquist, Black y Bode empezaron a estudiar los servomecanismos y reguladores desde el dominio de la frecuencia H. Black de los laboratorios Bell propuso la idea de un amplificador realimentado donde por medio de estos obtiene ganancias elevadas y por medio de arreglos obtiene señales estables y precisas, por su parte Bode demostró que dada cualquier función de respuesta en frecuencia $A(\omega)$ siendo A la amplitud de la ganancia en lazo abierto se le puede asociar una función $F\phi(\omega)$ siendo ϕ la fase mínima de dicha función de respuesta en frecuencia. De esta forma fue capaz de dar reglas para obtener la forma óptima de la ganancia del lazo en función de la frecuencia para un amplificador realimentado. La industria que en esos momentos se encontraba en pleno auge fue la más interesada en aplicar estas herramientas y debido a ello fueron laboratorio de pruebas para los investigadores, uno de los primeros controladores empleados ofrecían una acción de control tipo on-off por medio de un rele, muy por debajo de las exigencias de los procesos industriales en aquel momento pero poco a poco fueron desarrollándose obteniendo reguladores con acción proporcional, estos reguladores tienen un dilema desde su definición: precisión o estabilidad, si se desea un error estacionario pequeño, se debía aumentar la ganancia del regulador, o disminuir la banda proporcional, pero esto conlleva a que el sistema era sometido a oscilaciones indeseables en el transitorio. En cambio sí se aumentaba la banda proporcional disminuían las oscilaciones pero en caso de cambios en la carga aparecía un error estacionario apreciable. Durante un tiempo se trabajó en resolver este problema hasta que se implementó el término de acción integral, el primer regulador de acción proporcional integral fue el Fox Stabilog patentado por Mason en 1931. En 1942 Ziegler y Nichols,

ingenieros de Taylor Instruments realizaron un estudio que condujo a fórmulas empíricas para sintonizar el regulador PID al proceso “Optimum Settings for automatic Controller” fue presentado al “ASME Winter Annual Meeting” y las reglas siguen siendo empleadas actualmente en el proceso de control industrial. La segunda guerra mundial impulsó en gran medida el desarrollo de estas técnicas aplicándolas a la detección y seguimiento de objetivos, predicción posiciones, colocación del cañón en posición de disparo entre otras fueron las principales aplicaciones durante este periodo. H. Harris del MIT en su trabajo “The analysis and design of servomechanisms” introduce el uso de funciones de transferencia en el análisis de un Sistema realimentado esto permitió que los sistemas de control se representaran mediante diagramas de bloques y emplear las técnicas de control basados en frecuencia. Surgen nuevos enfoques en el estudio del problema de control como la conocida teoría estocástica clásica por Wiener este consiste en considerar la presencia de ruidos en las señales y se introduce el término de control óptimo el cual consiste en minimizar la superficie de error cuadrático. El advenimiento de la era computacional propicio el rápido desarrollo del control automático con lo cual el hombre pudo entre otras cosas llegar a la luna, la creación de entornos de simulación, sin embargo uno de los inconvenientes que tiene la computadora es que funciona por ciclos, es decir en tiempos discretos por lo cual requiere un tiempo ya definido para obtener los datos de entrada, realizar los cálculos y entregar los datos de salida, también requiere una conversión de datos ya que únicamente acepta dos datos uno o cero tanto en informática como en la electrónica que interviene en la comunicación es por ello que requiere la conversión de datos de digital a analógico (salida) y de analógico a digital (para ingresar datos a está) y es así como de la mano de Hurewicz desarrolló las ideas de teoría de sistemas continuos trabajada hasta ese momento aplicada a sistemas continuos perfeccionado por Linvili, Balken, Ragazzini, Zadeh y Salzer este último en 1954 introduce el termino de transformada Z (permite que los resultados obtenidos en el estudio de los sistemas continuos sea aplicado a los sistemas discretizados). A finales de 1958 Jury con el trabajo “Sampled data control systems” con el criterio de estabilidad, con los de Ragazzini y Franklin homónimo y con el de Tou en 1959 se termina por definir y establecer la teoría clásica de los sistemas muestreados. Por ultimo aparece un nuevo método de diseño de control conocido a partir de 1955 como teoría de control moderno el cual se basa en representar los sistemas en variables de estado los cuales trabajan casi exclusivamente en el dominio del tiempo, bajo este esquema resaltan los trabajos de Aizerman, Lerner, Lurie, Pontryagin, La Salle, Popov, Minorsky, Kalman y Bellman. La teoría de control moderna tiene su base en el concepto de estabilidad de Liapunov presentado a finales del siglo XIX, los criterios de observabilidad y controlabilidad de sistemas dinámicos lineales se deben a Kalman. [1]

1.2 Historia de la aviación:

El sueño del hombre de volar se remonta a épocas muy antiguas, al principio intento hacerlo con un par de alas artificiales pero evidentemente hacía falta algo más, su fracaso le llevó a investigar el porqué es que vuelan las aves, así comprendió que no solo las alas, sino todo el cuerpo del ave está en función del vuelo (en general las alas son más largas que su cuerpo, sus huesos son muy livianos y huecos) .Pero fue hasta los días de Leonardo Da Vinci que las ideas y primeros modelos fueron concebidos aunque sin mucho éxito pero anticipó varias teorías que siglos más tarde abrirían el camino a nuevas invenciones, en 1783 en Francia los hermanos Montgolfier inflaron un globo con aire caliente el cual es más liviano que el aire que está a su alrededor y lo remontaron en vuelo con 3 pasajeros, un pato, un gallo y una oveja. El globo permanecía siempre amarrado a tierra y solo descendía cuando se enfriaba el aire. En Inglaterra George Cayley por su parte construyo en 1850 planeadores que contenían los elementos estructurales de un avión: fuselaje, alas y cola, y a principios del siglo pasado Santos Dumont ensayaba con volar maquinas más pesadas y con motor, mientras tanto en los Estados Unidos, los hermanos Wilbur y Orville Wright, dueños de un taller de bicicletas invertían gran parte de su tiempo en estudiar la manera de lograr el control a voluntad de las máquinas voladoras, inventaron un túnel de viento para probar sus modelos de aviones, observando y estudiando especialmente las alas y las hélices, posteriormente estudiaron y modificaron un recientemente creado motor de combustión interna y fabricaron uno de 4 cilindros y 12 HP. Los años de trabajo se vieron recompensados ya que a fines de 1903, probaron su máquina voladora el “Flyer” equipada con un motor, la prueba se llevó a cabo en las dunas de Kitty Hawk, Carolina del Norte, consiguieron volar 40 metros, el momento pasaría a la historia: era el primer vuelo controlado de una máquina autopropulsada más pesada que el aire, 3 años más tarde repetirían la hazaña pero esta vez volaron 40 Kilómetros, habían abierto el camino del cielo. [2] El cuadricóptero, cuadrirrotor o simplemente cuadrotor es un helicóptero que se impulsa por medio de 4 motores las cuales tienen 4 hélices pero a diferencia de los vehículos de ala fija como los aviones estas hélices están orientadas verticalmente, fue hasta la década de 1920 cuando el norteamericano George de Bothezart (Fig. 1) fue el primero en volar a bordo de un cuadrotor de 1.6 toneladas impulsado por un motor de 220 hp el cual alcanzo una altura de 1.8 mts y se mantuvo en vuelo por 42 segundos, sin embargo aún faltaba mucho por investigar dentro de esta área y no fue sino hasta años recientes cuando debido entre otras cosas al abaratamiento de los sensores, motores y placas de control se ha investigado más en el campo de los vehículos no tripulados siendo los cuadricópteros uno de los vehículos más populares, por su reducido tamaño y ágil maniobrabilidad.

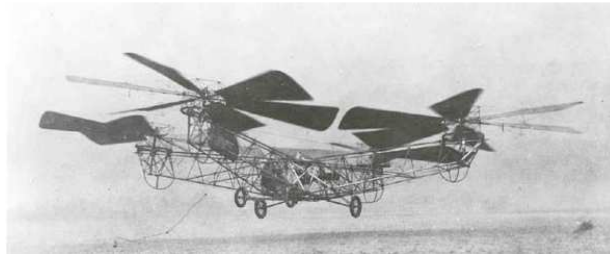


Figura 1 Cuadrotor de George de Bothezat

1.2.1 Vehículo aéreo no tripulado.

Un vehículo aéreo no tripulado, UAV por siglas en inglés (Unmanned Aerial Vehicle), o sistema aéreo no tripulado, UAS (Unmanned Aerial System) [3], conocido en castellano por sus siglas como VANT o drone, es una aeronave que vuela sin tripulación humana a bordo.

El ejemplo más antiguo fue desarrollado después de la primera guerra mundial y se emplearon durante la segunda guerra mundial para entrenar a los operarios de los cañones antiaéreos. Sin embargo, no es hasta finales del siglo XX cuando operan los 'VANT mediante radio control con todas las características de autonomía. En México el primer VANT documentado es el denominado el S4 Ehécatl. El propósito de este UAV es vigilar y monitorear terrenos peligrosos y las fronteras mexicanas.

Para brindar autonomía a un cuadricóptero este debe ser capaz de propulsarse sin ningún operador a bordo, se sustenta mediante fuerzas aerodinámicas, puede estabilizarse por medio de acelerómetros giroscopios basados en MEMS, los vehículos empleados con fines bélicos no entran dentro de esta categoría, sin embargo cabe hacer mención de las definiciones con respecto a términos empleados para describir a vehículos aéreos no tripulados los cuales son a saber los siguientes: UAV (Unmanned Aerial Vehicle) UAS (Unmanned Aerial System) Sistema aéreo no tripulado, RPV (Remotely Piloted Vehicle) vehículos piloteado a distancia, la diferencia básica entre un UAV y UAS es una clara distinción de tecnología aplicada dando a entender que la robótica aplicada a la aviación es más que simplemente la implementación de sensores y tarjeta controladora sino que es una asociación compleja en la que la aviónica y los algoritmos de control juegan un papel determinante, dando lugar a un sistema complejo y con alto desempeño. Algunos autores hacen diferencia entre los términos estableciendo que el UAV es el segmento aéreo del sistema UAS que incluye una estación tierra e infraestructura de comunicaciones [4], Por otro lado el termino RPV hace referencia a vehículos aéreos que vuelan sin piloto a bordo pero es teleoperado por un piloto en tierra, lo anterior no permite que sea autónomo ya que está siendo retroalimentado por una persona en tierra la cual controla la trayectoria y estabiliza el aparato, aunque las diferencias entre un UAS y un RPV parecen pocas es un gran cambio ya que mientras el UAS utiliza un FMS (Flight Management System) capaz de tomar decisiones sin necesidad de intervención humana, un RPV es simplemente un aparato que recibe señales en tiempo real producidas

por un piloto con la intención de controlarlo, actualmente uno de los principales retos dentro del área de la aviación no tripulada es que los UAV mejoren sustancialmente la autonomía motivo de este trabajo de tesis que busca implementar un control basado en retroalimentación visual, siendo el vehículo capaz de tomar decisiones en cuanto a seguimiento de trayectoria sin la intervención humana (a menos que ocurra un desperfecto).

1.3 Visual servoing

Los avances en el área de la robótica aplicada conllevan a la necesidad de buscar nuevas técnicas y estrategias de control, el término robot desde su concepción implica el control del ser humano sobre un dispositivo mecánico, este término se popularizó con el éxito de la obra R.U.R (robots Universales Rossum) escrita por Karel Capek en la década de 1920 y en su traducción al inglés de dicha obra la palabra checa robota, la cual significa trabajos forzados fue traducida al inglés como robot [5], y con este término se hace referencia a los dispositivos autómatas los cuales son máquinas capaces de realizar tareas y que pueden ser reprogramadas, con el paso del tiempo y los avances tecnológicos las técnicas de construcción y elementos con que son contruidos han ido evolucionando y poco a poco se les ha dotado de sensores que emulan a los sentidos humanos, siendo estas máquinas capaces de percibir señales eléctricas que por medio de transductores les permite interactuar con su entorno siendo actualmente capaces de emular prácticamente todos los sentidos con los que contamos los seres humanos e inclusive superando en algunos casos dichos sentidos. El empleo de un sistema de visión para realizar una tarea por parte de un robot tiene como definición genérica de Control Visual (Visual Servoing).

Dependiendo de la aplicación y el tipo de control empleado se puede mejorar la exactitud y robustez del robot empleando técnicas de control visual, la calidad del control visual empleado depende del número de características visuales extraídas, los cambios en las características de la imagen se relacionan directamente con los cambios de posición del robot, un factor importante a tomar en cuenta es el número de cámaras empleadas en este trabajo empleamos una sola cámara, sin embargo tiene algunas limitaciones como por ejemplo la necesidad de información adicional para determinar la profundidad de algún objeto, también existe la posibilidad de caer en singularidades y mínimos locales, estas limitantes pueden ser superadas empleando dos o más cámaras gracias a la información visual redundante donde la información de la profundidad queda implícita dentro de los algoritmos de control, otro aspecto a considerar es que en el control por retroalimentación visual se debe tener en cuenta que es de suma importancia para una correcta lectura e interpretación de los datos extraídos realizar una buena calibración de la cámara.

1.4 Estado del arte

Existen muchos artículos publicados con respecto al control de aeronaves empleando la técnica de retroalimentación visual algunas de mayor interés para este trabajo son las siguientes: “A UAV for bridge inspection: Visual servoing control law with orientation limits” En este trabajo se describe la dinámica de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) para el monitoreo de las estructuras y mantenimiento de puentes. Presenta una ley de control nueva basada en visión por computador para vuelos cuasi - estacionarias por encima de un objetivo planar. La primera parte de la misión de la UAV es la navegación desde una posición inicial a una posición final en un entorno 3D desconocido. La nueva ley de control utiliza la matriz de homografía es calculado a partir de la información obtenida del sistema de visión. El esquema de control se derivará con técnicas backstepping. A fin de mantener el campo de visión de la cámara, la ley de control utiliza funciones de saturación para delimitar la orientación UAV y limitarlo a valores muy pequeños [6]. Image-Based Visual Servoing for Vanishing Features and Ground Lines Tracking: Application to a UAV Automatic Landing, en este trabajo se define un marco de modelado unificado y un esquema de control visual basado en imágenes se introduce para evaluar la viabilidad de una orientación basada en la visión de un modelo de UAV durante misiones de estudio y para el aterrizaje automático. Las características de la imagen relevantes se seleccionan para permitir el objetivo propuesto, es decir, la disociación de rotación y traslación en la imagen, y permitiendo la separación natural entre los movimientos laterales y longitudinales de la aeronave. El diseño del controlador está adaptado para incluir la dinámica de aeronave y la salida de la visión en un enfoque de control óptimo lineal [7]. Unmanned aerial vehicles UAVs attitude, height, motion estimation and control using visual systems, este artículo presenta una aplicación de una aeronave y estimador de movimiento utilizando sistemas visuales como el sensor principal para el control de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) o como un sistema redundante para una Unidad de Medida Inercial (IMU) y sensores giroscopios . En primer lugar, se exploran las aplicaciones de la teoría unificada para las cámaras catadióptricos centrales de la actitud y la estimación de la partida, explicando cómo se proyecta el horizonte en la imagen catadióptrico y cómo está segmentado y se utiliza para calcular la actitud del UAV. Luego usan las imágenes para obtener una brújula visual, y calcula la rotación relativa y el rumbo del vehículo aéreo. Además, se muestra el uso de un sistema estéreo para calcular la altura de la aeronave y para medir el movimiento de la UAV. Por último, se presenta un sistema de seguimiento visual basada en controladores difusos que trabajan tanto en un UAV y una plataforma pan y tilt. Cada parte se prueba utilizando la plataforma UAV COLIBRI para validar los diferentes enfoques [8].

1.5 Planteamiento del problema:

En la Facultad de Ciencias de la Electrónica existen diversos trabajos de robots móviles que han sido diseñados, contruidos y controlados, este proyecto tiene como finalidad desarrollar

el prototipo de pruebas y comprobar su funcionamiento por medio del seguimiento de trayectoria empleando retroalimentación visual.

1.6 Objetivos

Objetivo general

Usar la técnica de retroalimentación visual para controlar la navegación de un cuadricóptero utilizando una cámara inalámbrica.

Objetivos específicos:

- Estudiar los conceptos básicos de aerodinámica y retroalimentación visual
- Caracterizar el cuadricóptero
- Estudiar el modelo dinámico del cuadricóptero
- Estudiar y caracterizar la cámara inalámbrica
- Realizar pruebas experimentales para la obtención-transmisión de video en vuelo
- Implementar una estrategia de control para controlar la navegación del cuadricóptero
- Realizar pruebas experimentales para el almacenamiento de la información
- Pruebas experimentales del sistema completo
- Publicación de Resultados
- Escritura de la Tesis

Cronograma general

Actividad	Tesis I	Tesis II	Tesis III
• Estudiar los conceptos básicos de aerodinámica y retroalimentación visual	x		
• Caracterizar el cuadricóptero	x		
• Estudiar el modelo dinámico del cuadricóptero	x	x	
• Estudiar y caracterizar la cámara inalámbrica		x	
• Realizar pruebas experimentales para la obtención-transmisión de video en vuelo		x	
• implementar una estrategia de control para controlar la navegación del cuadricóptero		x	x
• Realizar pruebas experimentales para el almacenamiento de la información			x
• Pruebas experimentales del sistema completo			x
• Publicación de Resultados			x
• Escritura de la Tesis			x

1.7 Justificación

El empleo de robots móviles es una plataforma perfecta para la enseñanza de conceptos básicos de robótica así como de control, sin embargo el desarrollo de prototipos requiere de una cantidad considerable de tiempo paciencia y experiencia en el diseño y construcción, este proyecto además de buscar comprobar el control por medio de retroalimentación visual busca crear un precedente sobre el cual se pueda seguir alguna línea de investigación empleando el diseño del prototipo desarrollado en este proyecto, siendo el control de trayectoria la prueba de funcionamiento de este prototipo.

1.8 Motivación

En la actualidad los vehículos aéreos no tripulados son empleados en muchas áreas. Esto nos motiva a estudiar diferentes tipos de control de las aeronaves, además con el avance de la tecnología se han abaratado los sensores basados en MEM'S empleados en la central de medición inercial, así como la miniaturización de las cámaras inalámbricas. Se empleó un microcontrolador basado en el chip Atmega2560 (Arduino mega) para controlar el vehículo debido a su versatilidad y amplia documentación además de la capacidad de comunicarse por los protocolos UART (empleado para la comunicación con la computadora) e IIC (empleado para la lectura de los sensores). Los sensores que conforman el vehículo son: un barómetro, acelerómetro y giroscopio para la central inercial, un sensor ultrasónico para estimar la altura y la cámara inalámbrica como sensor óptico en la retroalimentación visual. Estos avances tecnológicos permiten incrementar las posibilidades de obtener la información real, de una manera más fidedigna. En base a esto es que uno de los objetivos del proyecto es prescindir del GPS como sensor de posición delegando esta responsabilidad al sensor óptico.

1.9 Propuesta para la solución del problema

Para controlar el vehículo aéreo no tripulado se empleará como sensor principal una cámara inalámbrica, la cual captura el video y lo envía de forma inalámbrica desde la aeronave hasta la computadora con la cual se controla. El procesamiento de las imágenes se realiza por medio de OpenCV y una vez obtenidos los datos necesarios se retroalimenta al robot, solo se controla el seguimiento de trayectoria y específicamente el movimiento de guiñada (Yaw) empleando este sistema de control visual y se tendrá en consideración un radio control para que en caso de alguna falla podamos controlarlo manualmente y así evitar algún tipo de daño tanto del vehículo como a alguna persona.

En este trabajo se estudió el modelo dinámico de una mini aeronave, así como la calibración de una cámara empleando software específico para tal fin, se analizó su implementación en Matlab y V-Rev con fines de simulación, se implementó un sistema basado en un cuadricóptero comercial de bajo coste y con cámaras inalámbricas económicas, así como webcams para las prueba de un control abordó, el sistema está basado en una tarjeta Ardupilot mega y la comunicación se realiza de forma inalámbrica serial empleando un protocolo conocido como MAVLink, el procesamiento de las imágenes se ha realizado empleando el software OpenCV, estas herramientas pueden ser implementadas en un sistema de reducido tamaño como por ejemplo Raspberry pi.

1.9.1 Procesamiento de video

Se han probado herramientas tanto de arquitectura cerrada, como de código libre por parte de las de arquitectura cerrada se probó de Mathworks el módulo “Computer Vision System Toolbox”, la cual se emplea para el procesamiento e identificación de imágenes en diversos proyectos tanto de carácter privado como de gobierno (de los estados unidos) entre los proyectos más interesantes se encuentran las aplicaciones para el control de los robots en las misiones espaciales a marte así como la identificación de vehículos al cruce de semáforos entre otros, por parte de los proyectos de código abierto destaca OpenCV la cual son una serie de librerías que nos permiten procesar imágenes para obtener datos y emplearlos en diferentes lenguajes como C++, Python entre muchos otros además de ser multiplataforma y requerir pocos recursos para su implementación por lo cual se decidió emplear este último para el procesamiento ya que en algún futuro puede ser implementado en un sistema a bordo del vehículo.

1.9.1.1 Ventajas de emplear OpenCV

OpenCV es un conjunto de librerías opensource que pueden ser empleadas en diferentes lenguajes de programación como C++, Python e inclusive en Matlab estas librerías nos permiten implementar algoritmos para el análisis de video, imagen, reconocimiento de patrones, objetos, rostros, etc. y al ser multiplataforma pueden ser implementadas en sistemas como por ejemplo Linux que nos ofrece flexibilidad, estabilidad y la capacidad de asignar prioridad a los procesos (Al mismo nivel que los procesos de sistema), lo cual nos permite trabajar a una velocidad mayor, hoy en día es posible implementar estas librerías en sistemas como Raspberry-pi la cual es una computadora con un tamaño muy reducido y que tiene un sistema operativo basado en una variante de Debian Linux llamado Raspbian.

1.10 Estructura de la tesis

En el capítulo 1 Introducción aquí se define el problema, y se ofrece una breve explicación de antecedentes y la propuesta de solución al problema.

En el capítulo 2 fundamentos teóricos, en este capítulo se dan las bases de teoría de control, visual servoing y fundamentos de aerodinámica así como el estudio del modelo matemático del vehículo.

En el capítulo 3 Visual servoing, en este capítulo se ofrece información más detallada del proceso de control visual.

En el capítulo 4 Descripción de la planta (cuadricóptero) se exponen las partes que componen al cuadricóptero y el sistema de visión.

En el capítulo 5 Implementación, en esta parte se especifican las partes del cuadricóptero (prototipo) y se implementa el sistema.

En el capítulo 6 Apéndices. Aquí se muestran diagramas, y protocolos empleados.

Capítulo 2 Fundamentos teóricos (Fundamentos Teóricos)

En este apartado se analizan las leyes aerodinámicas en las cuales se basa el vuelo del cuadricóptero, en seguida se estudia el modelo de un cuadricóptero para poder controlarlo, posteriormente se analizan los fundamentos en los que se basa la captura y procesamiento de las imágenes así como el modelo de la cámara pinhole la cual usamos como sensor principal, se expone brevemente la teoría de control y por último se explica la técnica de control visual.

2.1 Aerodinámica

Los vehículos voladores se encuentran sometidos a fuerzas y fenómenos que son estudiados por la aerodinámica, la aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia cómo se mueven los gases al interactuar con cuerpos sólidos, dichas interacciones dan como resultado una dinámica específica de movimiento produciendo una aceleración, dirección y velocidad determinada. La velocidad juega un papel importante ya que a mayor velocidad es más perceptible el efecto producido del fluido sobre el sólido.

2.1.1 Principio de Bernoulli

El principio de Bernoulli, el cual comprobó experimentalmente, afirma que “la presión ejercida por un fluido (líquido o gas) es inversamente proporcional a su velocidad de flujo”, significa que en un fluido en movimiento la suma de la presión (p) y la velocidad (v) en un punto cualquiera permanece constante" es decir que $p + v = k$. Fig 2.1

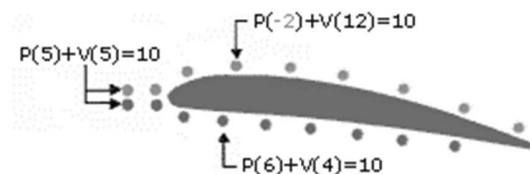


Fig. 2.1 Principio de Bernoulli

De lo anterior podemos inferir que si las partículas del aire aumentan la velocidad será a costa de disminuir su presión y viceversa. Fig 2.2.



Fig. 2.2 Relación velocidad-presión.

Es por ello que al diseñar perfiles aerodinámicos se toma en consideración las curvas que producirán un desplazamiento en las partículas del aire, que originarán una presión mayor en la parte inferior del perfil y originando una fuerza conocida como sustentación.

Otro científico, Giovanni Battista Venturi, comprobó experimentalmente que al pasar por un estrechamiento las partículas de un fluido aumentan su velocidad. Fig 2.3.

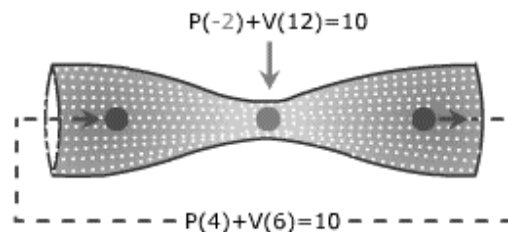


Fig. 2.3 Velocidad de un fluido al pasar por un estrechamiento

2.1.2 Perfil Alar

Como ya mencionamos la aerodinámica se encarga de estudiar las acciones que aparecen sobre los cuerpos solidos cuando existe un movimiento entre estos y el fluido sobre el cual se desplazan, aunque su campo de estudio es amplio, suele estudiarse los obstáculos fuselados (los que están pensados para perturbar poco la corriente que fluye a su alrededor). Uno de estos objetos son las alas de los aviones y las palas de los helicópteros y debido a que son objetos tridimensionales su análisis completo es complejo, por lo tanto para su estudio se divide en un conjunto de perfiles alares (un perfil alar es una sección resultante del cruce de un ala con un plano perpendicular a ésta. Fig. 2.4

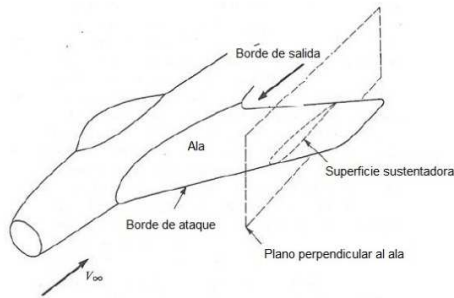


Fig. 2.4 Perfil alar

El borde de ataque en inglés leading edge (LE) es la primera parte del perfil que entra en contacto con el aire y el borde de salida trailing edge (TE) es la última, la línea recta que los une se llama línea de cuerda (chord line) y la distancia desde LE hasta TE es conocida como cuerda de perfil (chord) y se representa por la letra c . El combado (camber) es la máxima distancia entre la línea de media de combado (mean camber line) y la línea de cuerda, medida perpendicularmente a la línea de cuerda. El combado, (thickness) del perfil fundamentalmente controlan el lift y los momentos característicos del perfil. Fig.2.5

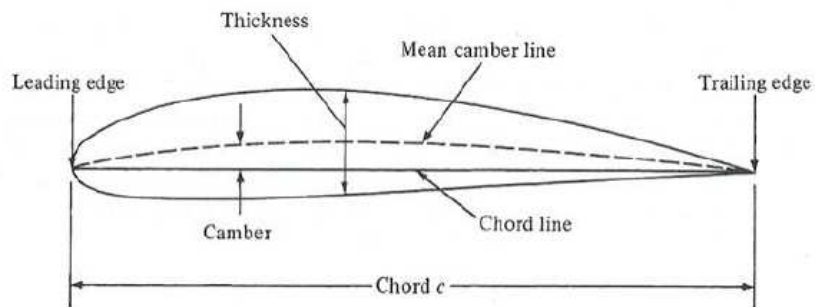


Fig. 2.5 Análisis del perfil alar

La velocidad del flujo libre V_∞ se define como el viento relativo, el ángulo comprendido entre el viento relativo y la línea de cuerda es el ángulo de ataque α del perfil, este ángulo influye directamente en el cálculo de lift L o sustentación y en el drag D o resistencia aerodinámica, esto se debe a que el ángulo de ataque hace variar las distribuciones de presión responsables de generar una fuerza resultante R con una orientación determinada. Como resultado de lo anterior lift y drag cambian de valor ya que estas son los componentes horizontal y vertical respectivamente de la fuerza aerodinámica generada. (Fig 2.6)

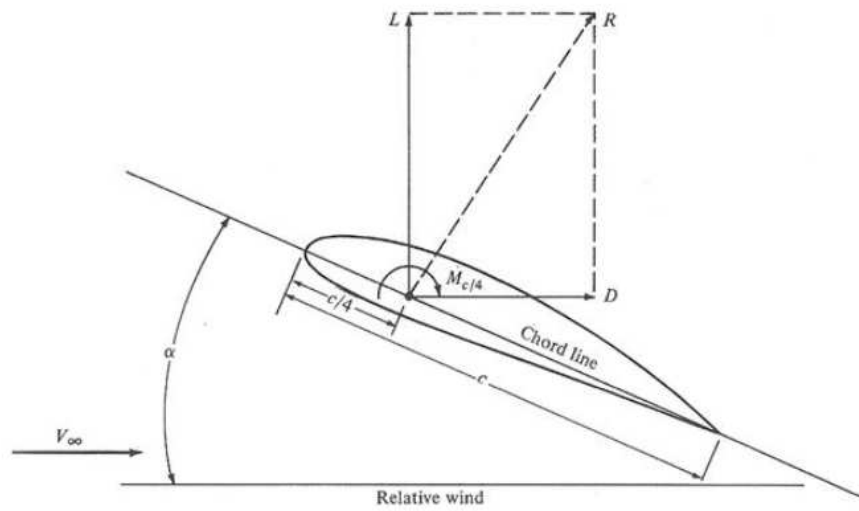


Fig. 2.6 Fuerzas aerodinámicas principales

Además de las fuerzas mencionadas anteriormente se encuentran las fuerzas normal N y axial A , a partir de estas dos últimas se obtiene L , D y R que es la resultante de todo el perfil. Fig 2.7

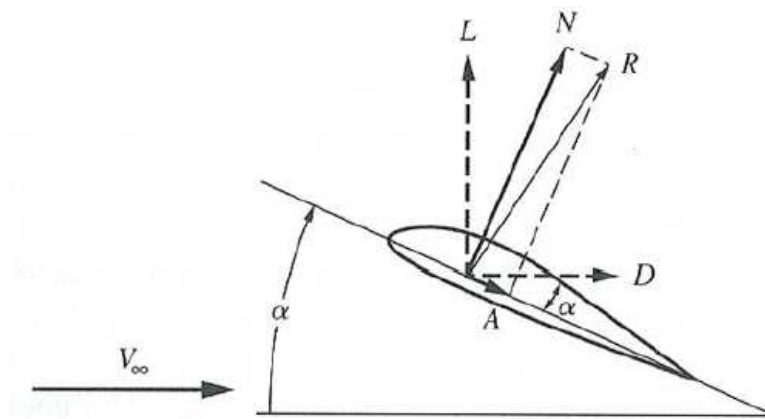


Fig. 2.7 fuerzas aerodinámicas

$$L = N \cos \alpha - A \sin \alpha \quad (2.1)$$

$$D = N \sin \alpha - A \cos \alpha \quad (2.2)$$

$$R = \sqrt{L^2 + D^2} \quad (2.3)$$

La fuerza aerodinámica genera un momento M que tiende a hacer girar el perfil, por otro lado un ángulo de ataque genera un momento determinado, sin embargo, existe un punto donde el momento generado permanece constante sin verse influido por el ángulo de ataque. Este punto recibe el nombre de centro aerodinámico.

Existen diversos factores de los que depende L , D y M las cuales son las siguientes:

La velocidad del flujo libre: V_∞

La densidad del flujo libre ρ_∞ determinada por la altitud.

Tamaño de la superficie aerodinámica

Angulo de ataque α

La forma del perfil alar.

El cociente de viscosidad μ_∞

La compresibilidad del flujo de aire.

Estos valores dentro del régimen subsónico, tanto el coeficiente que contiene el efecto de las fuerzas viscosas sobre el perfil, como la compresibilidad del flujo de aire pueden considerarse despreciables. Por lo tanto los valores de L , D y M se calculan de la siguiente forma:

$$L = q_\infty S c_l \quad (2.4)$$

$$D = q_\infty S c_d \quad (2.5)$$

$$M = q_\infty S c c_m \quad (2.6)$$

$$q_\infty = \frac{1}{2} \rho_\infty v_\infty^2 \quad (2.7)$$

Donde q_∞ es la presión dinámica, c_l el coeficiente de lift, c_d el coeficiente de drag, c la cuerda de perfil y c_m el coeficiente de momento. [9]

Para un vehículo de ala giratoria se tendría:

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho A V^2 \omega^2 R^2 \quad (2.8)$$

Donde:

V : Velocidad lineal

C_L : Coeficiente de sustentación

ρ : Densidad del aire ($1.3 \frac{kg}{m^3}$)

ω : Velocidad angular

R : Longitud de cada una de las palas

A : Area del disco rotor.

2.2 Cuadricóptero

Existen vehículos aéreos de ala fija y de ala giratoria, dentro de los vehículos de ala fija encontramos a los aviones convencionales estos son los aviones comerciales que realizan vuelos todo el tiempo, los de ala giratoria como los helicópteros y multirrotores como los cuadricópteros y los hexacópteros, estos últimos emplean el principio de vuelo estudiado anteriormente para generar la fuerza de sustentación necesaria para elevarse y mantenerse en el aire, adicionalmente empleando sus múltiples motores y mediante la combinación de las velocidades de estos generan los movimientos necesarios para trasladarse de un lugar a otro. [10].

Gracias al avance tecnológico en cuanto a procesadores, sensores y su miniaturización hoy en día podemos contar con los elementos necesarios para construir un vehículo aéreo no tripulado tipo cuadrotor de reducidas dimensiones para su estudio lo cual nos permite generar nuevas líneas de investigación en cuanto al control como por ejemplo empleando visual servoing. Pero antes debemos entender a detalle cómo funciona un cuadricóptero:

Un Cuadricóptero se puede clasificar de acuerdo a las referencias que tomemos de la estructura como tipo equis (x) o tipo cruz (+) y esto de acuerdo a la parte que tomemos como delantera del vehículo. En la configuración X tenemos dos rotores delanteros y dos rotores traseros (Fig. 2.8). Esta configuración es la más empleada cuando se desea colocar una cámara ya que deja libre de obstáculos la visión de la cámara.

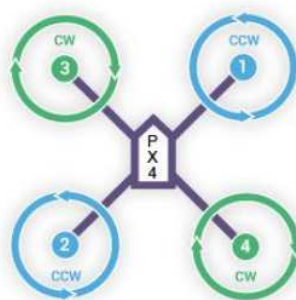


Fig. 2.8 Cuadricóptero configuración X

Mientras que en el cuadricóptero en configuración + se tiene un rotor en la parte frontal, un rotor en la izquierda, un rotor en la derecha y un rotor en la parte posterior (Fig. 2.9)

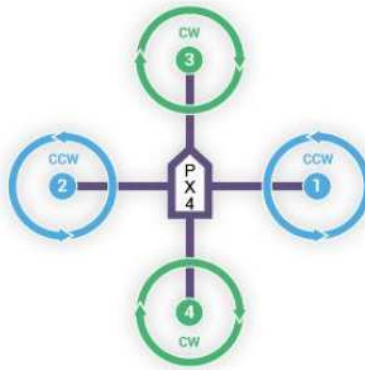


Fig.2.9 Cuadricóptero configuración +

2.2.1 Modelo matemático del cuadricóptero

Un modelo es una representación abstracta de algún aspecto de la realidad, para representarlos se utilizan por una parte elementos que caracterizan la realidad modelizada y las relaciones que existen entre ellos. Un modelo matemático es un tipo de modelo basado en lógica matemática cuyos elementos son esencialmente variables y funciones, las relaciones entre ellos se expresan por medio de relaciones matemáticas (ecuaciones, inecuaciones, operadores lógicos, etc.) que corresponden con las correspondientes relaciones del mundo real que modelizan.

El modelo matemático que corresponde al cuadricóptero se obtiene en base al esquema de la Fig. 2.10 es el siguiente:

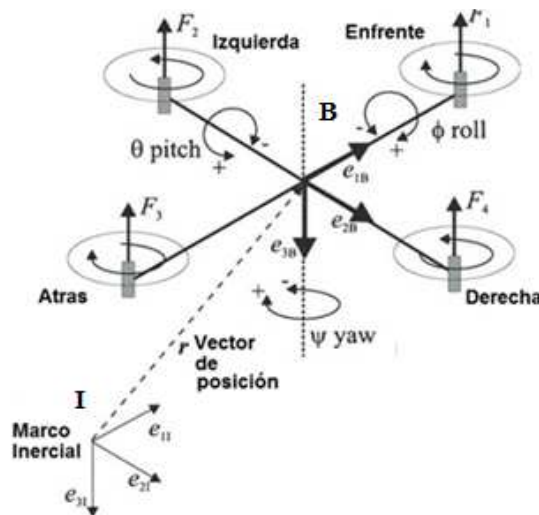


Fig. 2.10 Esquema del cuadricóptero.

Antes de analizar este modelo se deben hacer la siguiente suposición: el modelo es un cuerpo rígido en el espacio y está sujeto a una fuerza principal (empuje) y tres momentos (pares), en este apartado se analizará el modelo expuesto en [11].

Movimiento de Roll (ángulo ϕ). Este movimiento se realiza al desequilibrar las fuerzas entre f_2 y f_4 . Para el movimiento de cabeceo o Pitch (ángulo θ) el desequilibrio debe ser entre las fuerzas f_1 y f_3 . Para realizar el movimiento de guiñada o Yaw (ángulo ψ) se realiza por el desequilibrio de fuerzas entre (f_1, f_3) y (f_2, f_4). Finalmente el empuje total que hará que el vehículo se eleve se obtiene de la suma de la fuerza obtenida por los cuatro motores. Al ser un prototipo de estructura ligera el modelo dinámico debe incluir los efectos giroscopos resultantes tanto del cuerpo rígido rotando en el espacio, como de la rotación de las cuatro hélices [12].

El siguiente cuadro describe los principales efectos físicos actuantes en un helicóptero [12].

Efectos	Fuentes	formulación
Efectos aerodinámicos	Rotación de los rotors	$C\Omega^2$
Pares inerciales opuestos	Cambio de velocidad de los rotors	$J_R\dot{\Omega}$
Efectos de la gravedad	Posición del centro de masa	l
Efectos giroscópicos	Cambio en la orientación del cuerpo rígido Cambio en la posición del plano de los rotores	$J\theta\psi$ $J_R\Omega\theta, \phi$
Fricción	Todos los movimientos del helicóptero	$C\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$

Se considera además que la estructura del helicóptero es simétrica (matriz de inercia diagonal), el centro de masa se asume coincidente con el origen del sistema coordenado fijo al helicóptero. El helicóptero es un sistema subactuado con 6 grados de libertad y solamente 4 entradas de control, debido a las complejidades presentadas se realizarán algunas consideraciones para desarrollar el modelo tal como se sugiere en [13].

2.2.2 Orientación del helicóptero

La orientación de un cuerpo rígido puede ser obtenida utilizando diversos métodos como por ejemplo ángulos de Euler, cuaterniones, etc, A través de 12 definiciones independientes de los ángulos de Euler se puede representar la orientación relativa de dos sistemas coordenados, la convención utilizada en este trabajo es la Tiat-Bryan o también conocida como “ángulos de cardano” [14].

2.2.3 Rotaciones

Los ángulos de Tiat-Bryan son tres ángulos usados para describir una rotación general en el espacio Euclidiano tridimensional a través de 3 rotaciones sucesivas en torno de ejes del sistema móvil en el cual están definidos:

Rotación en el ángulo roll o de balanceo corresponde al primer giro sobre el eje x

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\text{sen } \phi \\ 0 & \text{sen } \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Rotación sobre el eje y a partir del nuevo eje y_L correspondiente a pitch o cabeceo

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \text{sen } \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen } \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

La tercera y última rotación corresponde al ángulo de giro yaw a partir de z_L para llevar al helicóptero a su posición final

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\text{sen } \psi & 0 \\ \text{sen } \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Existe una singularidad en $\theta \pm \pi/2$ Fig 2.11

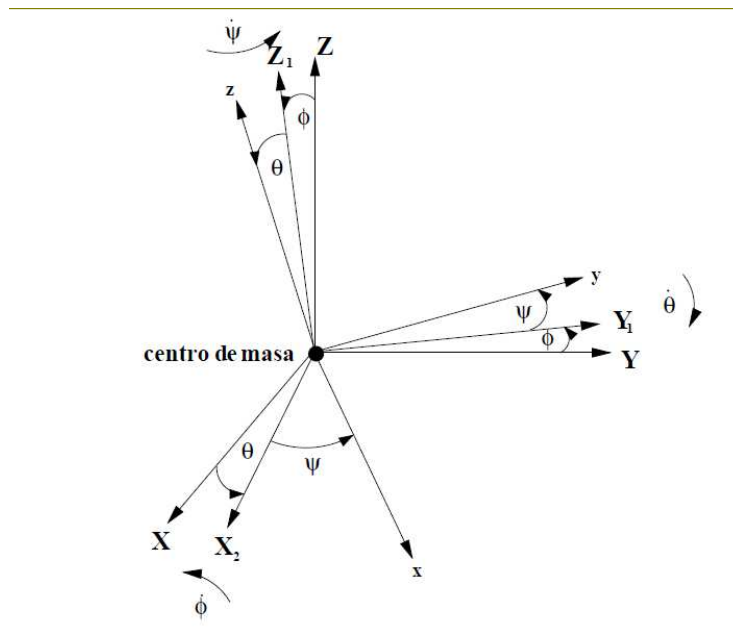


Fig. 2.11 Rotación de ángulos convención Tiat-Bryan

A partir de las rotaciones anteriores se definen las matrices de rotación que representan la orientación del cuerpo rígido rotando alrededor de cada eje:

$$R(x, \phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$R(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$R(z, \psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

La matriz de rotación completa de B, con respecto a I se llama matriz coseno directiva viene dada por [15].

$$R_I = R(x, \phi) \cdot R(y, \theta) \cdot R(z, \psi) =$$

$$R_I = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

La matriz de rotación en el sistema de coordenadas B es la traspuesta de R_I , debido a su propiedad de ortonormalidad. Gracias a esta propiedad podemos encontrar las ecuaciones cinemáticas de rotación del vehículo las cuales establecen las relaciones entre las velocidades angulares.

El sistema expresado en el sistema de coordenadas B es la traspuesta de R_I debido a su propiedad de ortonormalidad

$$R_B = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \cos \theta \sin \phi \\ \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Las ecuaciones cinemáticas para determinar la postura del helicóptero (consultar apéndice 1)

$$\dot{R}_I = R_I \cdot S(\omega) \quad (2.7)$$

Donde $\omega = [p, q, r]^T$ son las velocidades angulares en el sistema de coordenadas del cuerpo rígido y $S(\omega)$ la matriz anti simétrica. [16].

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Así manipulando matemáticamente se obtiene la siguiente relación (2.7) se obtiene (2.17)

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi \sec\theta & \cos\phi \sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

La relación entre las velocidades angulares en el sistema fijado al cuerpo y la variación en el tiempo de los ángulos de Tait-Bryanse obtiene a través de la inversión del Jacobiano de 2.17 y viene dada por:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Estas velocidades angulares pueden ser medidas desde los giroscopios, normalmente se utilizan Unidades de medición inercial (IMU) para medir las rotaciones y calcular directamente los ángulos de Tait-Bryan [16].

El movimiento rotacional del cuadricóptero viene dado por las componentes de las velocidades angulares de balanceo (p) velocidad angular de cabeceo (q) y velocidad angular de guiñada (r), estas velocidades se deben a los pares ejercidos sobre el sistema producidas por las fuerzas externas, las cuales definen los diferentes momentos en los tres ejes: momento de balanceo (L) momento de cabeceo (M) y momento de guiñada (N). [17].

2.2.4 Modelo dinámico

Para analizar el modelo de un cuadricóptero se consideran en primer lugar los ángulos de Euler ψ, ϕ, θ que representan los angulos de rotación para Z, X e Y respectivamente y se consideran dos sistemas de referencia E para referencia a tierra y B para la referencia cuerpo [17].

$$F_{XYZ} \begin{cases} ma_x = (\cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi)U_1 \\ ma_y = (\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi)U_1 \\ ma_z = (\cos\theta \cos\phi)U_1 - mg \end{cases} \quad (2.19)$$

$$\tau_{\phi\theta\psi} = \begin{cases} I_x \ddot{\phi} = \dot{\theta}\dot{\psi}(I_y - I_z) - J_R \dot{\theta}\Omega + lU_2 \\ I_y \ddot{\theta} = \dot{\phi}\dot{\psi}(I_z - I_x) + J_R \dot{\phi}\Omega + lU_3 \\ I_z \ddot{\psi} = \dot{\phi}\dot{\theta}(I_x - I_y) + lU_4 \end{cases} \quad (2.20)$$

Donde:

ψ : Ángulo yaw

ϕ : Ángulo roll

θ : Ángulo pitch

$I_{X,Y,Z}$: Momento de inercia del cuerpo

J : Rotor de inercia

l : Longitud del brazo

k : Coeficiente de empuje

d : Coeficiente de resistencia

$U_1 = k(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)$ Empuje total

$U_2 = k(\Omega_4^2 + \Omega_2^2)$ Diferencia de empuje en el eje Y

$U_3 = k(\Omega_3^2 + \Omega_1^2)$ Diferencia de empuje en el eje x

$U_4 = d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2)$: Diferencia del par

$\Omega = -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4$: Velocidad general de giro del motor.

Obtención de la información de posición y velocidades

Para obtener la información de la posición y velocidad necesaria para controlar el vehículo se requiere de una tarjeta de adquisición de datos y sensores como giróscopos acelerómetros, barómetros y un sensor de distancia, estos se encuentran contenidos dentro de la tarjeta conocida como unidad de medición inercial (IMU) existen muchas en el mercado algunas muy costosas y de arquitectura cerrada, se hizo una comparación entre las distintas tarjetas existentes en el mercado tratando de emplear alguna de arquitectura abierta, las ventajas que ofrece tener una arquitectura abierta es que podemos tener acceso al software de programación para poder hacer modificaciones de acuerdo a nuestras necesidades, también nos brinda la posibilidad de interactuar con una comunidad de programadores entusiastas que comparten el código e ideas para poder implementarlas en nuestros trabajos algunas tarjetas consideradas para la elaboración de este trabajo fueron multiwii, APM, openpilot, kk2 entre otras, pero se eligió a las basadas en microcontroladores Arduino debido a si amplia documentación así como filosofía de código abierto estas tarjetas son Ardupilot mega (APM) y Multiwii.

2.3 Control

La teoría de control es un campo interdisciplinario de la ingeniería y las matemáticas, que trata sobre el comportamiento de sistemas dinámicos. A la entrada de un sistema se le llama referencia. Cuando una o más variables de salida de un sistema necesitan seguir cierta referencia sobre el tiempo, un controlador manipula la entrada al sistema para obtener el efecto deseado en la salida del sistema (retroalimentación). (Fig. 2.12)

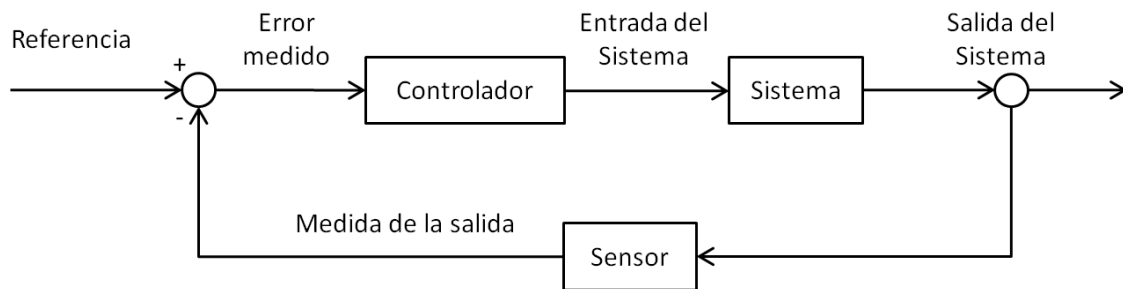


Fig. 2.12 diagrama de bloques de un sistema de control

2.4 Visual servoing

En este apartado solo se da una pequeña introducción al concepto de retroalimentación visual ya que en el siguiente capítulo se abordará a fondo este tema,

El estado actual de la ciencia y tecnología es el resultado del trabajo de muchas personas que se atrevieron a ir más allá de lo que se conocía en su época, de personas que se atrevieron a soñar y tuvieron ideas nuevas que para su tiempo eran difíciles de concebir, muchas de esas ideas dieron origen a lo que conocemos como máquinas simples a partir de las cuales se originan todos los mecanismos que conocemos y que en conjunto forman máquinas más complejas y gracias a esto nace la robótica que con el tiempo da vida a nuevas áreas de investigación como la mecánica y el control, a partir de ese momento aparece la necesidad de dotar a estas máquinas con sensores que emulando a los sentidos humanos le permitan interactuar con el medio en el que se desenvuelven. Estas máquinas que cada vez son más complejas e independientes ahora dotados con sensores emulando los sentidos humanos son capaces actualmente de oler, de oír, de palpar y actualmente de “ver”, aunque están muy limitados y aun dependen en gran medida de los seres humanos existen máquinas que hasta cierto punto son autónomas, por lo menos hasta que se les termine la batería claro está o necesiten alguna programación nueva quizá simplemente se descompongan por algún desperfecto o simplemente por el uso se desgaste alguna pieza importante. Las tareas que realizan de forma autónoma son realizadas sin ser conscientes de lo que hacen, es decir solo siguen instrucciones que tienen como finalidad realizar una tarea bien definida como tomar

alguna decisión dentro de las opciones para las que fue programado y en el mejor de los casos realizar una operación y volver a su punto de partida para reportar los datos obtenidos, todo ello gracias a los sensores que tiene dentro, esta tesis trata sobre cómo podemos dotar a un robot con un sensor de visión emulando la vista humana y como puede obtener información empleando ésta para tomar decisiones.

Podemos definir la percepción visual humana como la habilidad de procesar, interpretar y analizar la información recibida del espectro de luz visible mediante nuestros ojos, [18]. Ya que por naturaleza estamos limitados a percibir solo dentro de ese espectro de luz, sin embargo y gracias al avance de la tecnología los robots que tienen sensores ópticos poseen un rango mayor de percepción es decir pueden ver frecuencias más allá del ultravioleta, o menores del infrarrojo. Actualmente los robots realizan tareas muy complejas empleando la visión como por ejemplo los robots que reconocen los rostros, existen robots capaces de reconocer a una persona a distancia, también existen robots que reconocen matrículas de automóviles, la velocidad de estos al pasar por un punto de control etc. este trabajo tiene como finalidad el poder servir como precedente a la maestría en electrónica, opción automatización y control de la facultad de electrónica de la Benemérita universidad autónoma de puebla implementando el control por retroalimentación visual aun robot móvil y al mismo tiempo desarrollar un prototipo que sirva para futuras pruebas siguiendo esta línea de investigación, para la prueba final de este prototipo se programara como seguidor de trayectoria de tal forma que pueda seguir una línea empleando para ello una cámara que servirá de sensor óptico.

Capítulo 3 Visual servoing

La percepción visual es quizá el sentido del que en mayor medida depende el hombre ya que en prácticamente todo el tiempo que permanecemos conscientes durante el día estamos mirando alguna cosa. Sin lugar a dudas mirar no es lo mismo que observar análogamente el hecho de que una computadora tenga almacenada una imagen no significa que extraiga información de la misma, cuando nosotros miramos algo y nuestra mente está pensando en alguna otra cosa es posible que no nos percatemos de algún suceso importante aunque esté frente a nuestros ojos, una computadora que tiene una cámara no es capaz de extraer la información de las imágenes que obtiene por sí sola, para una computadora una imagen son solo matrices de números en secuencia. Para obtener información importante requiere de procesos y técnicas de procesamiento, el ser humano por naturaleza y en base a la experiencia es capaz de identificar por medio de la vista objetos y sus características como textura, distancia, forma, la orientación, el color, la luminosidad, etc. Algunos de estos parámetros los conocemos haciendo uso de otros sentidos, sin embargo en ocasiones el reconocimiento de las imágenes se ve entorpecido por factores que son difíciles de evadir, pues son resultado intrínseco del concepto de imagen como por ejemplo el tipo de iluminación, las oclusiones entre objetos, sombras, perspectiva etc. En esencia el proceso de procesamiento de una imagen se realiza capturando una imagen y aplicando un posterior tratamiento de la información obtenida, en el caso del hombre la primera fase la realiza el ojo y la segunda el cerebro, en los robots la captación se consigue por medio de un sensor óptico por ejemplo una cámara y el procesamiento compete a una computadora trabajando en tiempo real, existe una analogía entre la cámara y el ojo humano, mientras en la cámara la captación de la imagen se realiza por medio de unos sensores fotovoltaicos, en el ojo tenemos las células sensoriales ubicadas en el tapizado interior denominado retina, los bastones y los conos son las células de la retina sensibles a la luz. Los conos procuran la visión cromática, pero no son tan sensibles a la luz como los bastones, con los que se obtiene la visión en blanco y negro. Los conos al igual que los puntos de la pantalla de las cámaras son de tres clases. Cada tipo de conos capta un sector de escala cromática. En la retina existe una zona denominada mancha amarilla, en la que la visión cromática y de detalle es más perfecta; contiene números conos y escasos bastones, por lo que no se ve con nitidez en la oscuridad, con la tecnología actual por más buena que sea la cámara no llegará a compararse con el maravilloso sistema de visión que tenemos los humanos y no solo por la compleja, rápida y nítida que es, sino porque encierra aun misterios que no podemos replicar como por ejemplo existe un sistema de comunicación entre los bastones y conos contiguos que permite acentuar el contraste entre las distintas partes de la imagen. La manera que tiene el ojo de enfocar se realiza cambiando la forma del cristalino y, por ello, la distancia focal, esta se realiza por medio de un músculo anular llamado ciliar, que al contraerse hace que el cristalino se engruese y al relajarse se

estreche, de manera análoga el enfoque en las cámaras se realiza variando la distancia de la lente con el objeto [19].

3.1 Imágenes:

Una imagen es una representación de una escena real ya sea en blanco y negro o a color para poder procesar una imagen primero debemos guardarla en el ordenador y para ello hacemos uso de las cámaras las cuales pueden guardar la información obtenida en archivos de imagen (estáticas) o en video, los videos son sucesiones de varias imágenes guardadas consecutivamente en un espacio de tiempo determinado por el número de imágenes por segundo, una imagen puede verse como una entidad compuesta por pequeñas secciones, una imagen digital está dividida en pequeñas secciones llamadas “picture cells” o pixels, en imágenes tridimensionales reciben el nombre de volumen cells o voxel, el tamaño del pixel es el mismo lo que varía es el color y la intensidad.

3.2 Obtención de imágenes (sensores ópticos)

Para capturar una imagen la computadora se basa en dispositivos conectados como periféricos de entrada. Los cuales pueden ser un escáner, una cámara digital o una web cam, en cada caso se emplea sensores que varían su carga eléctrica dependiendo de la luz que incide en ellos, existen dos tecnologías empleadas para tal fin la primera está basada en los sensores CCD los cuales existen desde el año 1969 y fueron desarrollados por Wilard Boyle y George E. Smith para los laboratorios de AT&T Bell Labs. Este dispositivo fue bautizado como Charge Buble Devices en el año 2009 recibieron el premio nobel de la física por este descubrimiento y se basaba en leer una serie de valores de carga de un arreglo y convertirlos en señales digitales, este hecho marco el inicio de la fotografía digital y fue hasta que Michael Tompseet en 1971 patentó un dispositivo que era capaz de actuar como escáner el cual denominó Charge Coupled Devices (CCD) su funcionamiento se basa en que los fotodiodos reciben la luz al ser sensibles a la luz la convierten en una carga de electrones la cual es almacenada en un arreglo y por medio de registros de desplazamiento es llevada una a una a un amplificador para después ser convertida en digital por medio de un conversor analógico / digital (A/D) a señales que procesará la computadora destinada para tal fin.(Fig. 3.1)

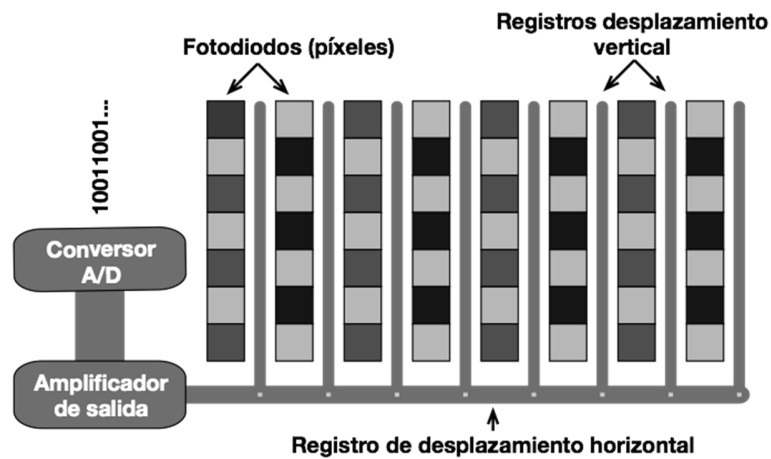


Fig. 3.1 Sensores tecnología CCD

Por su parte los sensores CMOS basan su nombre en el proceso de fabricación basado en tecnología CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) semiconductor complementario de óxido metálico, en estos la electrónica que realiza la conversión se encuentra presente en cada arreglo y las señales generadas son enviadas empleando también un conversor analógico digital (Fig. 3.2).

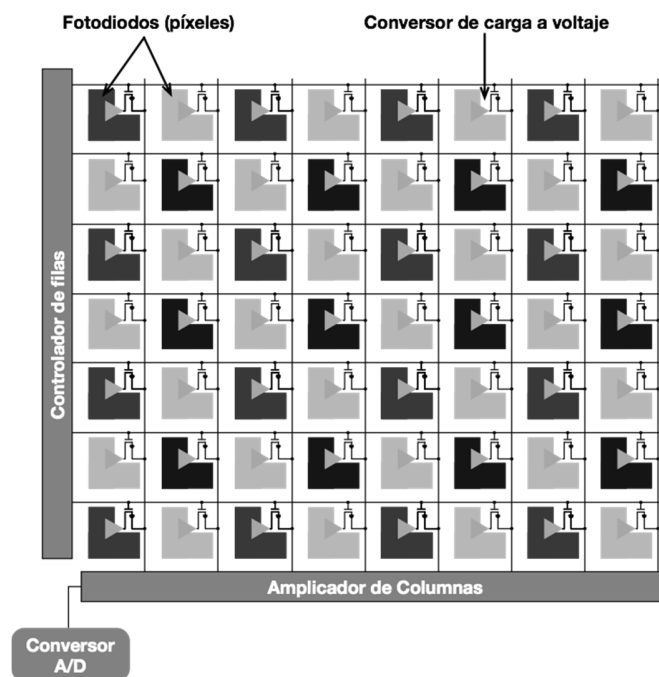


Fig. 3.2 Sensores con tecnología CMOS

Como mencionamos anteriormente un pixel es el elemento básico que compone una imagen y una imagen se define como un conjunto de pixeles que en su forma matricial se representa de la siguiente manera: $I(x,y)$ y la notación para un pixel sería $i(x,y)$

$$I(x,y) = \begin{pmatrix} i(0,0) & i(0,1) \dots & i(0,M-1) \\ i(1,0) & i(1,1) \dots & i(1,M-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ i(N-1,0) & i(N-1,1) \dots & i(N-1,M-1) \end{pmatrix}$$

3.3 Transformaciones morfológicas

Existen operaciones que se realizan a un conjunto de pixeles o a la imagen completa con el fin de mejorar o resaltar las características de la imagen, en nuestro caso para extraer la información proveniente de la cámara emplearemos filtros para “ver” únicamente la trayectoria marcada y reducir el ruido.

Las Transformaciones Morfológicas (Morphological Transformations o Morph Transforms) son operaciones ya definidas que podemos hacer sobre las imágenes (mascaras) para transformarla empleando un kernel (una matriz de convolución) la cual realiza operaciones en la máscara pixel a pixel como suma, resta multiplicación, de acuerdo a lo que necesitemos, algunas de las más representativas son:

3.3.1 Erosión

Al aplicar un operador erosión a una imagen reducirá los objetos blancos de la máscara de tal forma que “erosionará” el blanco. Fig. 3.3

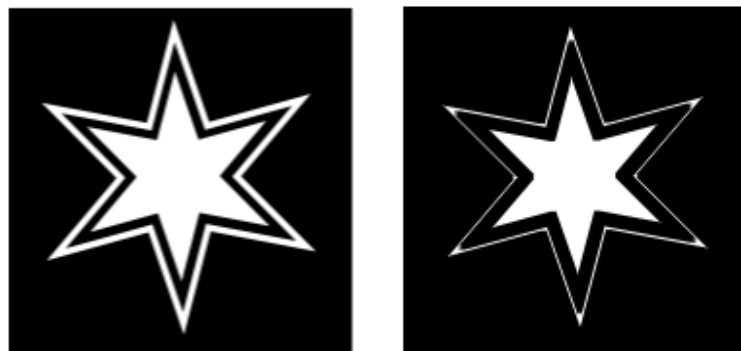


Fig. 3.3 Morfología erosión

3.3.2 dilatación

Esta operación dilatará el color blanco (Fig. 3.4)

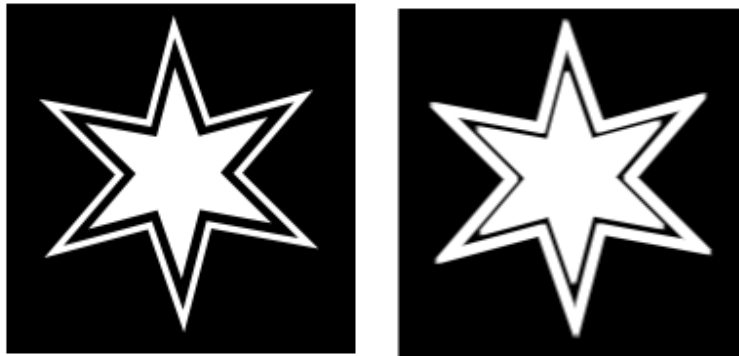


Fig. 3.4 Morfología dilatación

3.3.3 Morphological Gradient

Es la diferencia entre la dilatación y erosión (Fig. 3.5)

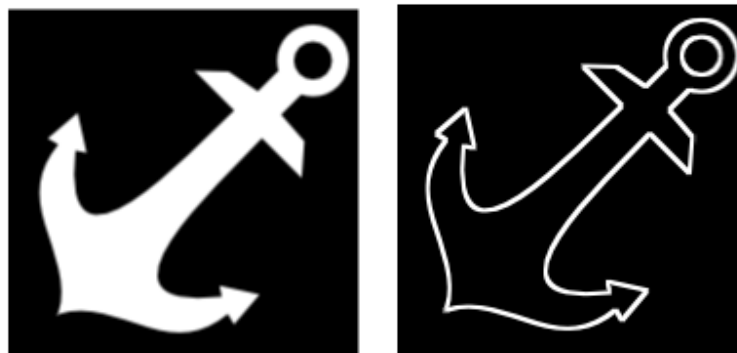


Fig. 3.5 Morfología gradiente

3.3.4 Opening

Es el resultado de aplicar una erosión seguida de una dilatación y nos sirve para quitar el ruido. (Fig 3.6)

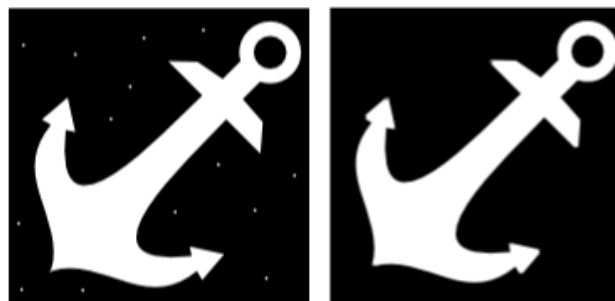


Fig.3.6 Morfología

3.4 Control por retroalimentación visual.

El término de “control visual” se introdujo en el artículo de Hill y Park en 1979. [20] para reemplazar el término de “retroalimentación visual” que era más específico y de uso muy generalizado. Sin embargo fue hasta 1980 cuando se introduce la primera clasificación de control visual de la mano de Sanderson y Weiss en sus publicaciones de 1985 y 1987 describiendo las diferencias entre las dos principales esquemas de control que son el control visual basado en imagen (IBVS) y el control basado en posición (PBVS) [21] [22].

3.5 Criterios de configuración

Existen dos principales criterios basados en el número de cámaras y en la posición que guardan con respecto al robot.

De acuerdo al número de cámaras se divide en:

Sistema monocular: solo se emplea una cámara para la captura de la imagen, esta configuración tiene como ventajas que empleará un menor procesamiento, sin embargo tiene como desventaja la pérdida de información como la profundidad aunque esta información puede ser obtenida de diversas formas, empleando para ello otro sensor, o estimándola a partir de otro parámetros.

Sistema stereo: lo conforman dos cámaras que toman simultáneamente imágenes y tiene como ventajas la generación de entornos en 3D además de que puede implementarse la geometría epipolar, como desventajas requiere un mayor poder de procesamiento para realizar estos cálculos.

Sistema de cámaras redundantes: Este tipo de sistema se emplea para obtener información adicional, por ejemplo un robot puede estar trabajando con un sistema stereo configuración cámara en mano y una tercera cámara puede estar observando la escena desde una posición superior de tal forma que le permita ver obstáculos con anterioridad.

De acuerdo a la posición con respecto al robot:

Cámara en mano En esta configuración la cámara esta fija a la estructura del robot y se mueve junto con este, las imágenes obtenidas tienen una relación directa entre el sistema de coordenadas de la cámara y el del efector final (en el caso de los robots manipuladores).

Cámara fija: en esta configuración la cámara se encuentra observando la escena desde un punto distante del robot, le permite observar la trayectoria y evadir obstáculos, tiene como desventaja una menor resolución, la relación entre el sistema de coordenadas de la cámara y el sistema de coordenadas de la base del robot es constante de manera que la posición de la

cámara es independiente del robot, en esta configuración la vista de la escena es global se puede tener una vista tanto del robot como del objeto de control.

Híbrida Esta configuración es una combinación de las anteriores donde se aprovecha la información en primera persona que ofrece la configuración cámara en mano y la información global de la configuración cámara fija, las ventajas son: puede realizar de forma más precisa tanto posicionamiento como seguimiento de trayectoria.

En función de la estructura de control

Control visual directo

Bajo este esquema de control el controlador convierte directamente empleando la información obtenida mediante el sensor óptico en torques que alimentan a las articulaciones del robot, este esquema tiene como ventajas la velocidad de respuesta aunque por otro lado puede generar vibraciones. (Fig. 3.7).

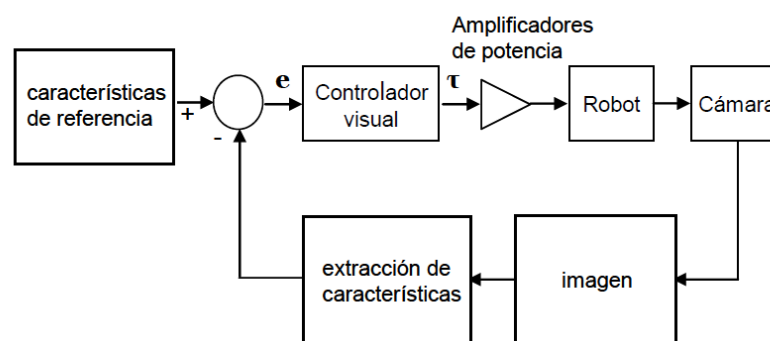


Fig.3.7 Control visual directo

Mirar y mover estático

En este esquema la extracción de información visual y el control del robot son dos tareas separadas donde luego de extraerse y procesarse la información sigue la tarea de control, el robot entonces se mueve asumiendo que el ambiente no ha cambiado, este esquema no se considera como retroalimentación visual.

Mirar y mover dinámico

En este esquema de control el resultado de la retroalimentación visual alimenta en controlador interno del robot que se encargará de posicionar el robot, para realizar lo anterior se deben manejar bien los tiempos (el controlador $< 10\text{ms}$) debe ser mayor que el controlador visual (40 o 50 ms). El control visual y el controlador del robot deben estar desacoplados esto ayuda a delegar funciones para no saturar al controlador visual, en la actualidad existen muchos robots que aceptan coordenadas cartesianas o posiciones incrementales, para no

saturar al controlador visual además de la relativa baja velocidad del controlador visual. Experimentalmente la integración de la retroalimentación visual permite una operación eficiente y relativamente rápida a pesar de los errores propios de la calibración de la cámara o del modelo cinemático. Fig. 3.8.

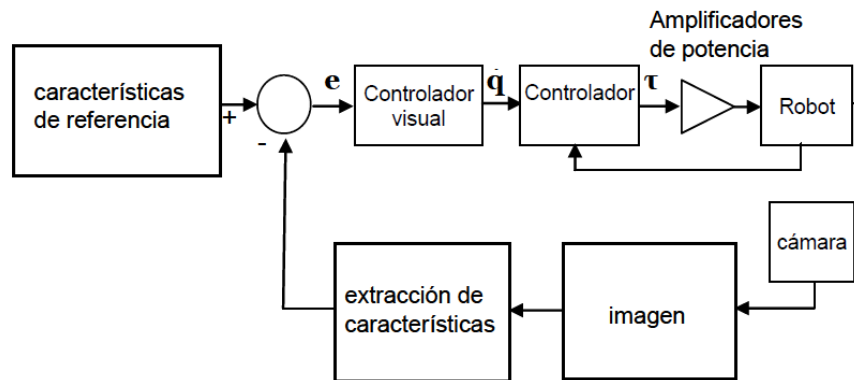


Fig. 3.8 Mirar y mover dinámico

En función de la definición del error

Control visual basado en posición (PBVS)

A este esquema de control también se le conoce como control visual 3D

Las características visuales de la imagen son utilizadas para calcular la posición y orientación del objeto de control en un espacio cartesiano 3D, este esquema de control depende mucho de una buena calibración de la cámara y de su relación geométrica cámara robot, este esquema tiene como desventaja que es altamente susceptible a perturbaciones, la trayectoria se controla directamente en un espacio tridimensional, en este esquema se asume que los modelos son perfectos en [23]. Se demuestra la estabilidad asintótica global con la suposición del conocimiento perfecto de los modelos. (Fig. 3.9)

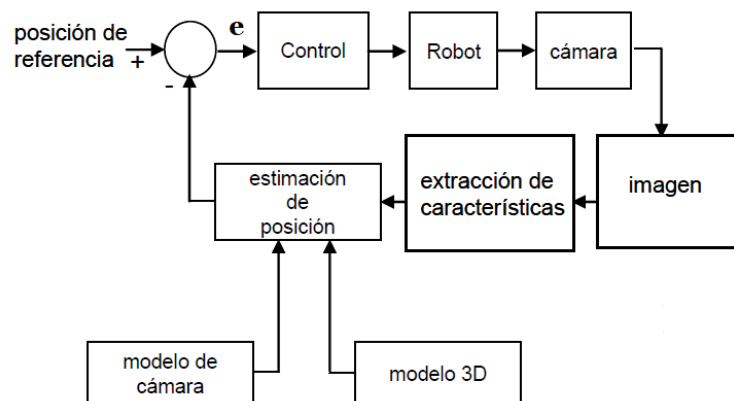


Fig. 3.9 Modelo PBVS

Control visual basado en imagen (IBVS)

Este esquema también es conocido como control visual basado en características (IBVS) o control visual en 2D en esta estrategia de control la función del error y la ley de control son definidos directamente en el plano 2D de la imagen y no es necesario el conocimiento del modelo 3D del objeto, El control visual puede realizarse estimando el Jacobiano de la imagen o calculándolo analíticamente. (Fig. 3.10)

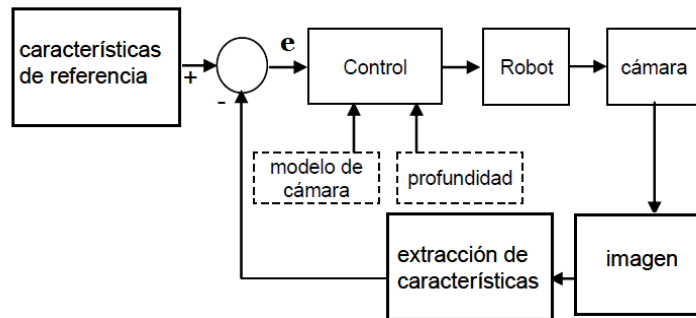


Fig. 3.10 Modelo IBVS

Para la estrategia de control se puede elegir entre calcular o estimar el Jacobiano en cada posición actual del objeto de tal manera que se tiene un Jacobiano actualizado para cada posición o calcular solamente el Jacobiano que pertenece a la posición deseada.

Control visual híbrido

Este esquema de control se desacoplan las componentes de translación y las de rotación la ley de control está en función de las características de la imagen y de algunos parámetros de la orientación y la posición del objeto el esquema más representativo es el control visual 2 ½ con el que se consigue una estabilidad asintótica global en presencia de posibles errores de calibración (Fig. 3.11)

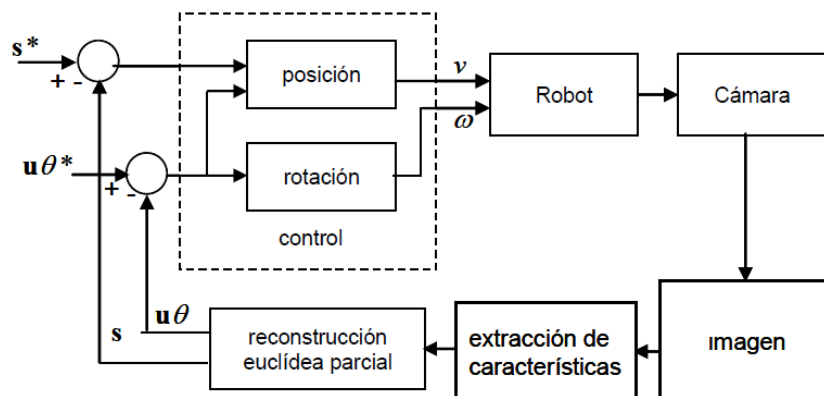


Fig. 3.11 Control híbrido

Control visual basado en movimiento

Esta estrategia de control se basa en la medición del flujo óptico que es una medida del movimiento de un objeto en la imagen (Fig. 3.12)

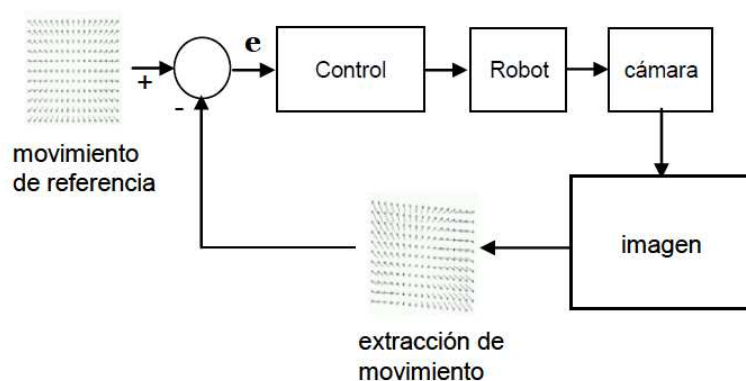


Fig. 3.12 Flujo óptico

Modelo de la cámara pinhole

Dado que vamos a controlar empleando técnicas de visión el sensor necesario para tal fin es una cámara inalámbrica, por ello se estudia su descripción y modelado, ya que este sensor nos proporcionará información necesaria para cerrar el lazo de control, y posicionará el cuadricóptero en la posición deseada, para ello se requiere de tener los parámetros internos y externos, necesarios para modelar el sistema de la cámara.

El modelo de la cámara Pinhole describe la relación matemática que existe entre las coordenadas de un punto 3D y su proyección en el plano de la imagen 2D (ver fig. 3.13)

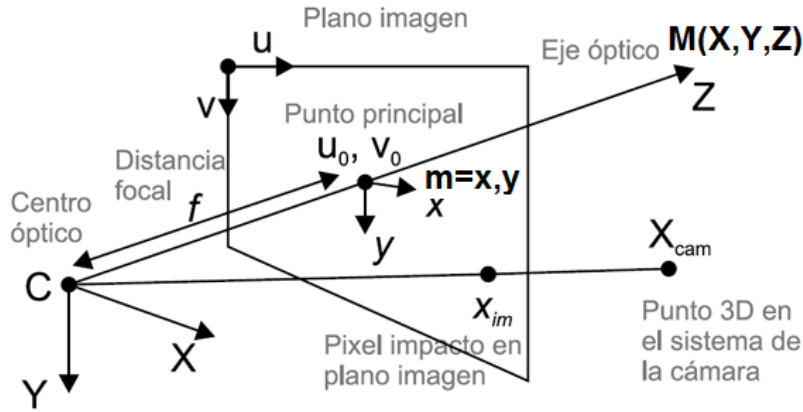


Figura 3.13 Modelo de cámara pinhole

La cámara realiza una proyección de un punto M en el espacio a un punto m en el plano de la imagen, a través del centro óptico de la cámara, el punto M tiene coordenadas (X_c, Y_c, Z_c) , queda representado en el plano de la imagen por un punto m con coordenadas (u, v) , con referencia a un punto central de la imagen (u_0, v_0) donde el punto principal de la cámara se encuentra en el eje óptico de la misma a una distancia focal f del centro del sensor (ecuación 3.1).

$$\frac{u}{x_c} = \frac{u_0}{y_c} = \frac{f}{z_c} \quad (3.1)$$

3.6.1 Parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara:

El punto m puede expresarse de manera alterna con referencia al borde izquierdo superior en coordenadas x, y (en píxeles) mediante una transformación (ecuación 3.2).

$$x = u_0 + f_x u ; y = v_0 + f_y v \quad (3.2)$$

La cual en forma matricial se expresa en la ecuación 3.3.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Donde:

K Es la matriz de parámetros intrínsecos, la cual es una matriz de 3×3 que describe tanto la geometría como la óptica de la cámara; f_x, f_y son las distancias focales en x , y respectivamente.

De la ecuación 3.1 se tiene que:

$$\tilde{q} = \frac{1}{z_c} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = (u, v, 1)^T \quad (3.4)$$

Donde $\tilde{q}$ es un punto expresado en coordenadas proyectivas.

Parámetros extrínsecos:

Dado un punto de un objeto P , este queda expresado en el sistema de coordenadas respecto a un origen $\{W\}$ de la forma (Px_w, Py_w, Pz_w) , estableciendo otro sistema de referencia al origen $\{C\}$ situado en el centro del eje óptico de la cámara (ver Fig. 3.12), a partir de esta relación geométrica se definen los parámetros externos los cuales determinan la posición y orientación del sistema en coordenadas de la cámara con respecto al sistema de coordenadas del objeto. [24].

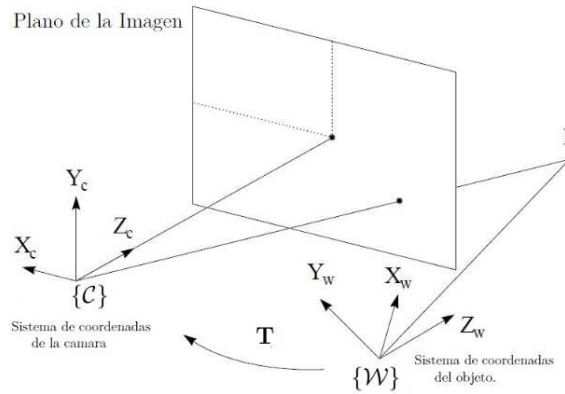


Figura 2.12 Plano de la imagen

La posición del centro óptico $\{C\}$ con respecto a $\{W\}$ se obtiene por medio de un vector de translación t de la siguiente forma, ver ecuación 3.5.

$$t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Capítulo 4 Componentes mecánicos de un cuadricóptero

El cuadricóptero está compuesto por diferentes partes tanto mecánicas como electrónicas e informáticas cada una de ellas es sumamente importante y todas deben estar perfectamente comunicadas en este apartado se analizara la parte mecánica ya que para su construcción se debe tener conocimiento de cada una de ellas.

4.1 Estructura

El primer elemento a considerar es la estructura (frame) Fig. 4.1 Éste servirá de sostén y dará cuerpo y dimensiones al robot, uno de los aspectos a tener en cuenta es que debe ser de un material capaz de soportar golpes y no destruirse al primer vuelo, los materiales comúnmente empleados para construirlos son la fibra de vidrio, fibra de carbono, y plástico, por sus características físicas generalmente es la parte que aportará más peso al sistema y debe pensarse muy bien qué tipo de frame se requiere y de qué material de acuerdo a la finalidad del cuadricóptero ya que existen algunos diseños pensados para carreras, para tomas fotográficas, con fines recreativos, etc. De acuerdo al tipo de cuadricóptero seleccionado se puede implementar alguna protección (guarda propellers) con la finalidad de no dañar tanto a las personas como a las hélices y objetos con los que pudiera chocar, estos últimos son opcionales pues no requiere de ellos el cuadricóptero para su funcionamiento sin embargo es altamente recomendable conseguirlos cuando no se tiene experiencia en el manejo de los cuadricópteros, en caso de diseñar el frame se debe tener en consideración que debe ser simétrico, de un material liviano y resistente, tomando en consideración una adecuada distribución de masa de tal forma que el centro masa quede en el centro geométrico del vehículo, diseñarlo rígido pues las vibraciones afectarían al robot en su mecánica e introducirían ruido a los sensores dificultando su control



Fig.4.2 Frame

4.2 Motores

Los motores empleados en aeromodelismo se les conocen como motores Brushless (Fig. 4.2), estos motores son trifásicos pero de corriente directa, para su control requiere un circuito conocido como ESC (Fig. 4.3). Existen dos tipos de motores Brushless el que por lo general se emplea en aeromodelismo se conoce como tipo outrunner y en este la armadura no tiene movimiento y es el imán permanente el que gira sobre su eje. Para lograr el movimiento se requiere se 3 señales.

Cuando un motor convencional (con escobillas) transmite la energía a las bobinas del rotor, este gira en un campo magnético fijo cuando está energizado, sin embargo al realizar esta acción las escobillas fijas tienen contacto con el metal que se encuentra girando en el rotor, esto inevitablemente provoca un desgaste que a lo largo del tiempo provocará desperfectos y un cambio en la respuesta del motor, adicional a la perdida de potencia se pueden formar arcos eléctricos indeseables. Lo anterior se elimina con los motores Brushless ya que no emplea la fuente de desgaste, por lo cual no habrá perdida de potencia adicional a lo anterior se incrementa su fiabilidad y la eficiencia del motor, se incrementa notablemente la velocidad existe una respuesta dinámica más rápida, produce menos ruido (electrónico) a mayor

velocidad en comparación con los motores con escobillas en cambio pierde torque al arrancar una característica de estos motores es el alto consumo de corriente.

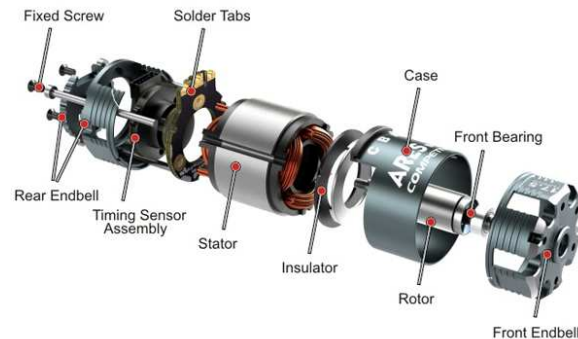


Fig. 4.2 Motor brushless

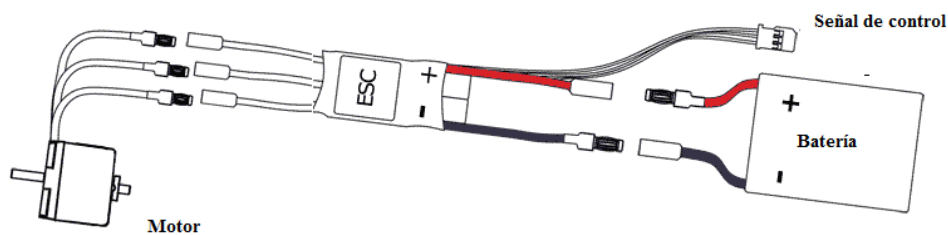


Fig. 4.3 Conexión del motor con ESC

El parámetro que se debe tener en cuenta a la hora de elegir un motor es la relación de RPM del motor sin carga, está definido por el valor kv.

4.3 ESC (controladores electrónicos de velocidad)

Estos dispositivos se encargan de entregar las señales adecuadas para el correcto funcionamiento del motor, la corriente para la cual está diseñada debe ser mayor que la que consume el motor de otra forma puede dañarse el motor, el principio de funcionamiento es muy sencillo y se puede ver en la Fig. 4.4. Existen proyectos de código abierto para su construcción, sin embargo requiere de componentes difíciles de adquirir y resulta necesario fabricar una PCB de reducidas dimensiones (componentes de montaje superficial) Fig. 4.5

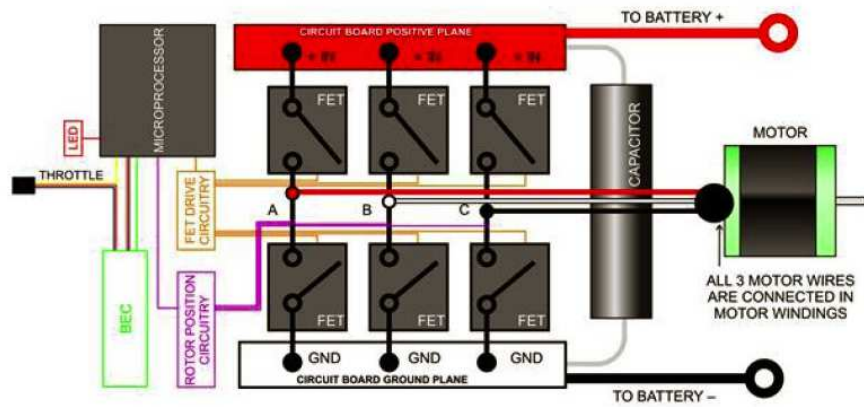


Fig.4.4 Electrónica del ESC

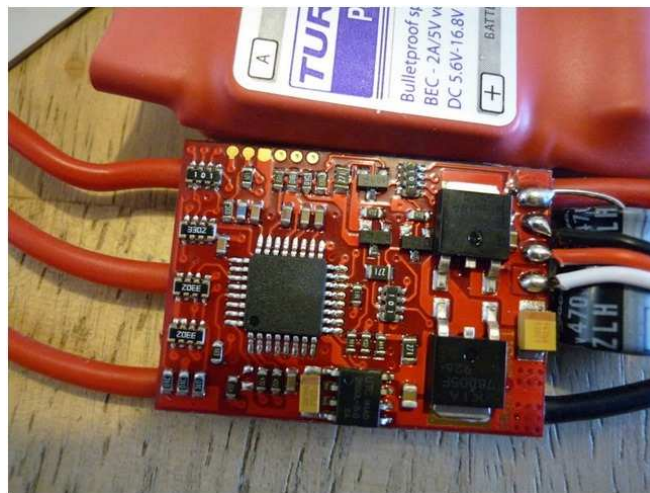


Fig. 4.5 Componentes del ESC

Las señales producidas se observan en la Fig. 4.6

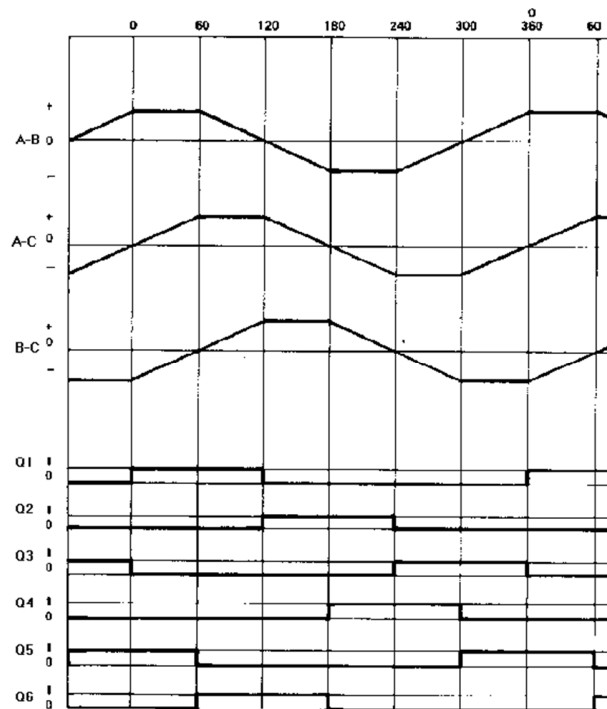


Fig.4.6 Señales de control enviadas por el ESC

Su conexión con el motor se observa en la Fig. 4.7

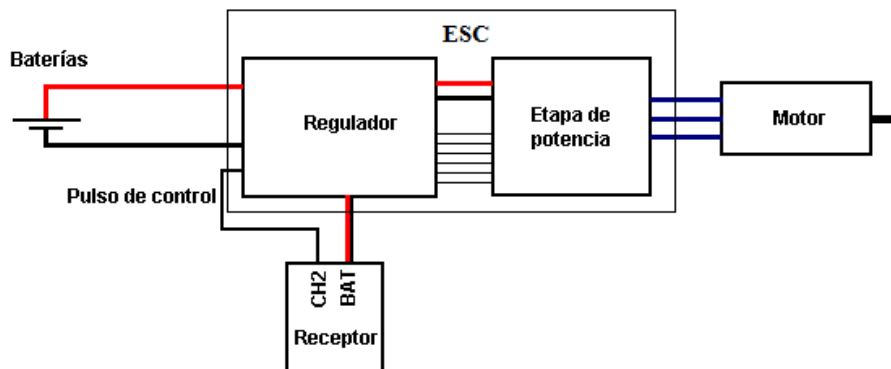


Fig. 4.7 Conexión con el motor

4.4 Las hélices o palas

Las hélices proporcionarán la fuerza de sustentación necesaria para elevar el cuadricóptero y aunque su elección aparentemente es sencilla debe tenerse presente las características que estas ofrecen ya que existen de muchos tipos y son diseñadas para producir diferentes efectos.

Un cuadricóptero requiere de 4 hélices de las cuales 2 giraran en sentido horario mientras que las otras dos lo harán en sentido antihorario Fig 4.8. Esto es con la finalidad de anular/aprovechar los efectos giroscópicos de tal forma que se logra mantener un vuelo estacionario (anulando mutuamente los efectos giroscópicos) o hacer girar el cuadricóptero de acuerdo a las necesidades (creando un desbalance de velocidad entre las hélices) , para hacer una adecuada selección de las hélices existen tablas que pueden consultarse antes de realizar la compra.



Fig. 4.8 Hélices sentido horario y antihorario

4.5 Batería

La batería proporciona la energía necesaria a los motores y la electrónica, la duración del vuelo depende en gran medida de la capacidad de ésta (Fig 4.9). Existen diferentes tecnologías de baterías sin embargo la que más ha destacado son las basadas en Litio-polímero debido a su relativamente bajo peso y capacidad de carga, las baterías están formadas por celdas y cada celda proporciona 3.7 volts. Las celdas pueden conectarse internamente en serie en cuyo caso se describe por medio de la letra S o en paralelo descritas con la letra P. Estas baterías requieren algunos cuidados especiales ya que se pueden dañar tanto si se carga de más (por arriba de os 4.22 Volts) o si se descarga mucho (por debajo de los 3.2 volts). Existe también un parámetro que indica la capacidad de carga/descarga

indicada por la letra C por ejemplo una batería que tiene 3S carga 1C, descarga 20 C continuos y 25 C 10 seg max. y 1500 mAh, indica que proporcionará 11.1 volts (3.7×3) nominales (con un mínimo de 9.6 y máximo de 12.6 (esto dependiendo del fabricante lo cual se puede consultar en el manual que viene con la batería) el motor al que se cargará no debe consumir más de 30 A ($1.5\text{Ah} \times 20$) y durante un máximo de 10 segundos podrá trabajar a 37.5 A ($1.5 \text{ Ah} \times 25$). La carga se compone de 3 fases claramente diferenciadas:

Subida de intensidad y tensión La batería empieza cargando a una intensidad mínima que va subiendo hasta la seleccionada. El voltaje de la batería también va subiendo. Esta fase es muy corta y en algunos cargadores no llega a ser visible.

Subida de la tensión con intensidad constante Ya se ha alcanzado la intensidad de carga seleccionada, la tensión va aumentando hasta los 4.22v por elemento. En el caso del ejemplo hasta 12.6v. Esta es la fase de carga de la batería, la que más dura. La batería habrá cargado aproximadamente el 80% de su capacidad.

Bajada de la intensidad con tensión constante Una vez alcanzada la tensión máxima, la intensidad de carga empieza a bajar lentamente sin que en ningún momento se sobrepase la tensión máxima. Cuando la intensidad de carga baja al mínimo del cargador, normalmente 0.1A, el proceso de carga ha finalizado. Esta fase no es tan larga como la anterior y viene a completar el último 20% aprox. de la capacidad de la batería. Como va bajando la intensidad, la última parte es la que más lento carga.

Existen algunos cuidados extra que se deben tener presentes, en primer lugar debe ocuparse un cargador específico para las baterías LiPo. Con una carga mayor a la de la batería, en todo momento debe estar vigilando la carga ya que puede ocurrir un incendio, no se deben golpear bajo ninguna circunstancia las baterías, si se van a guardar por un largo periodo de tiempo se debe mantener a carga nominal, y si se va a llevar de viaje debe trasladarse en bolsas especiales ignífugas, si una batería se encuentra inflada es señal de que puede estar dañada y por último para ser desechadas debe descargarse por completo.



Fig.4.9 Batería LiPo

4.6 Control remoto

El control remoto debe tener mínimo 6 canales, 4 para controlar los movimientos básicos y 2 auxiliares para conectar y desconectar el modo automático o manual Fig. 4.10, existen muchas marcas y calidades uno de los aspectos a tomar en cuenta para la correcta elección es la frecuencia ya que puede causar interferencia entre los componentes del sistema (la transmisión inalámbrica y la telemetría), el control remoto elegido funciona a 2.4 Ghz.



Fig.4.10 Control remoto de 6 canales

4.7 Placa controladora

La placa controladora es una de las partes más importantes, contiene los sensores de presión (barómetros) acelerómetros, y giroscopios, además se encarga de leer las señales enviadas desde el control remoto y la telemetría, por ultimo envía la información necesaria a los ESC para estabilizar el vehículo cuando se está en modo de vuelo estacionario y mover hacia la posición deseada, existen muchos comercialmente hablando, tanto de arquitectura abierta como de arquitectura cerrada y varían mucho en cuanto a precios debido a la calidad de sus componentes y al tipo de marca, un aspecto importante que debemos tener presente es la calidad de los elementos y el protocolo de comunicación para la telemetría, las tarjetas controladoras de arquitectura cerrada ofrecen a lo mucho algún API para la comunicación, en cuanto a los de arquitectura abierta ofrecen todo un protocolo de comunicación que se realiza vía comunicación serial pudiendo conectarse de diferentes maneras ya sea via Wifi (XBEE wifi) o por bluetooth todo esto de forma inalámbrica, dentro de las placas controladoras contempladas se encuentran las placas basadas en microcontroladores Atmel específicamente los Atmega328 (Fig. 4.11) y Atmega2560 (Fig. 4.12).

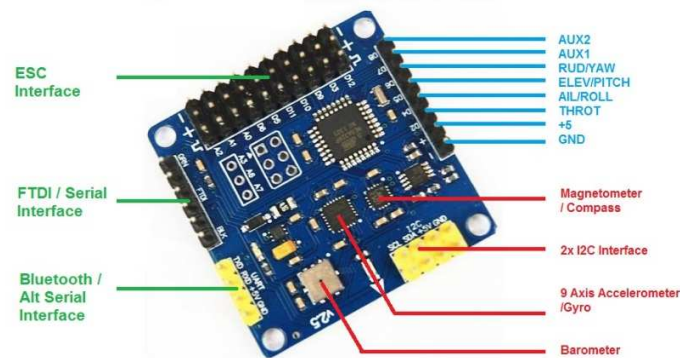


Fig. 4.11 Placa Multwii basada en Atmega328

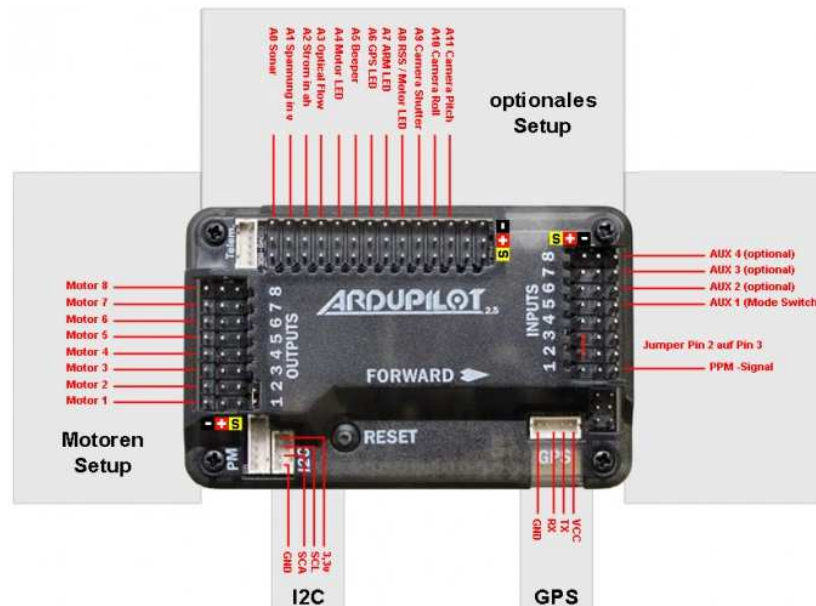


Fig. 4.12 Placa APM basada en Atmega2560

4.8 Sistema de visión y retroalimentación con la computadora

Para realizar la retroalimentación (visual) se requiere de un medio para en primer lugar capturar las imágenes y llevarlas a la computadora para procesarlas, esto se realiza con un sistema de captura de video (Fig. 4.13), existen muchas marcas y calidades pero el funcionamiento es el mismo, por medio de una cámara se realiza la captura y ésta se envía de forma inalámbrica, esto del lado del transmisor que se coloca dentro del cuadricóptero en el lado del receptor se encarga de recibir la información y enviarla a la computadora por medio de una tarjeta de captura, esta trabaja en 5.8 Ghz.



Fig.4.13 Sistema de captura de video

4.9 Tarjeta capturadora de video

Esta tarjeta recibe la información proveniente del receptor, se conecta por medio del puerto USB a la computadora y produce un retardo en la imagen de algunos milisegundos (Fig. 4.14), la elección se hizo en base al formato proporcionado por el receptor (PAL) y se consiguieron dos de diferente proveedor debido a que se hicieron pruebas en una computadora Raspberry pi, para la cual no existían drivers y el desarrollo del mismo requería de un considerable tiempo para aprender a programar dicho driver, recurso que no se tenía contemplado, cabe señalar que existen otras tarjetas que reducen el tiempo de retardo pero a un mayor costo.



Fig. 4.14 Tarjeta capturadora de video

4.10 Telemetría

Esta parte cierra el lazo de control, se compone de un transmisor que se conecta mediante USB a la computadora y el receptor se localiza en el cuadricóptero (Fig. 4.15), recibiendo las instrucciones enviadas para corregir la trayectoria, esto se realiza, la frecuencia empleada es de 433 Mhz, Ésta crea en la computadora un puerto serial (COM) virtual el cual se utilizará para enviar la información.



Fig. 4.15 Telemetría empleada a 433 Mhz

5 Capitulo Cuadricóptero Implementación

5.1 Hardware

El frame que se empleará es el de un F450 (Fig 5.1) más detalles en el Apéndice 2

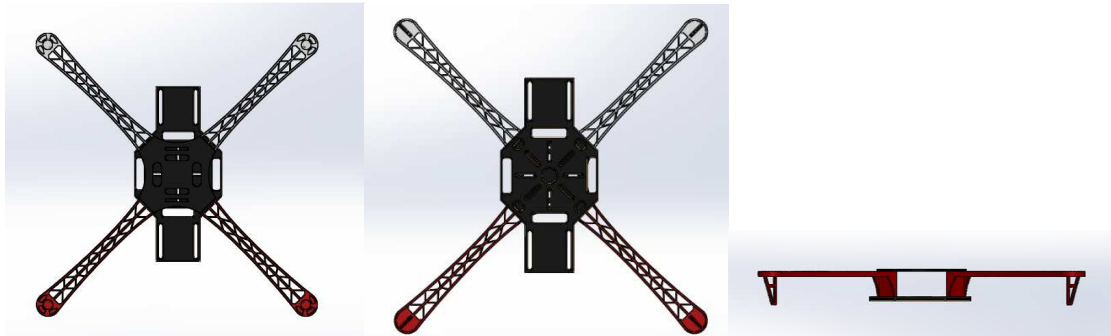


Fig. 5.1 Frame f450

Los motores empleados son el modelo A2212/13T el cual es un Motor sin escobillas o brushless controlado por PWM lo recomiendan para sistemas de vuelo tipo cuadricóptero o sus variaciones así como para vehículos aéreos de ala fija. El motor soporta hasta 12 A y se recomienda usar un controlador ESC de 30A. Fig. 5.2



Fig. 5.2 motor brushless A2212/13T

Sus especificaciones son:

Motor Brushless KV1000.

Diametro del eje: 3.175mm.

Corriente: 12A/60s.

Controlador recomendado: ESC 30A.

Propelas adecuadas: 8x4.5" 9x4.5" 10x4.5" 10x4.7"

Ideal para baterías de lipo 2 a 3 celdas.

Su hoja de datos se encuentra ver en el Apéndice 3

5.1.1 Caracterización del cuadricóptero:

Empezaremos por identificar los parámetros fuselaje de cuerpo rígido

Empleando una báscula digital se obtuvo el peso del cuadricóptero el cual es $m=1.095$ el peso de cada motor es de .049 kg, para simplificar el modelo teniendo una buena aproximación de los parámetros, se considera al cuadricóptero como una estructura inercial formada por dos varillas perpendiculares correspondientes a los brazos con un punto de masa en cada borde (la masa del motor) (Fig. 5.3)

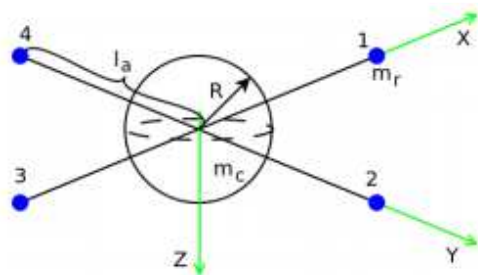


Fig. 1 Modelo para el calculo.

Se debe suponer que toda la masa excluyendo las de los rotores se encuentra distribuida de forma homogénea dentro de una esfera de radio 13.6 centrada en el origen de los ejes y sabiendo que el momento de inercia de una esfera sólida alrededor de un eje σ se calcula por $^sI_\sigma = \frac{2}{5}m_sR^2$ mientras que para l_a está dado por $^rI_\sigma = m_rl_a^2$, sabemos que la masa total es $m = 1.95 \text{ kg}$ debemos quitar el peso de motor multiplicado por 4 $m_s = 1.095 - 4m_r = 0.899 \text{ kg}$ el momento de inercia de los ejes X, Y son iguales porque son simétricos por lo tanto calculando tenemos:

$$I_x = I_y = {}^2I_x + {}^4I_x + {}^sI_x = {}^1I_y + {}^3I_y = 2(m_rl_a^2) + \frac{2}{5}m_sR^2 = 2.26103 \cdot 10^{-2} \text{ kgm}^2$$

Para el cálculo en z los 4 motores deben ser considerados

$$I_z = \sum_{j=1}^4 {}^jI_z + {}^sI_z = \sum_{j=1}^4 (m_r l_a^2) + \frac{2}{5} m_s R^2 = 6.5039 \cdot 10^{-2} \text{kgm}^2$$

Quedando calculados los parámetros:

Símbolo	Valor	descripción
m	1.095kg	Masa total
l_a	0.247m	Largo del brazo al centro de masa
$I_x = I_y$	$2.26103 \cdot 10^{-2} \text{kgm}^2$	Momento de inercia alrededor de los ejes X e Y
I_z	$6.5039 \cdot 10^{-2} \text{kgm}^2$	Momento de inercia alrededor del eje z

Cálculo del tiempo de vuelo

Contamos con tres baterías pero el cálculo se hará para 1 batería de 2.2 mAh con un voltaje nominal de 11.1 volts solo tomaremos en cuenta el consumo de los motores pues el consumo de la tarjeta controladora es despreciable el consumo de los motores a potencia máxima es de 10 amperes por lo tanto

$$11.1V * 10A = 111W$$

El consumo total de los motores sería

$$111 * 4 = 444W$$

$$\text{El tiempo de vuelo a máxima potencia} = \frac{E}{P} = \frac{2.2Ah * 11.1V}{444W} = 0.055h \approx 3.3 \text{ min}$$

Debemos tener presente dos cosas, en primer lugar no trabajará a máxima potencia por lo cual el tiempo de vuelo es mayor, pero recordando el estudio visto en el capítulo anterior si descargamos la batería por debajo de cierto nivel se puede dañar irreversiblemente por lo tanto se optó por emplear una alarma para la batería LiPo, esta suena cuando el voltaje está próximo a llegar al nivel más bajo permitido.

Cálculo del peso soportado por el motor.

Para medir la fuerza producida por los motores Brushless se elaboró una mesa de pruebas. Fig 5.3

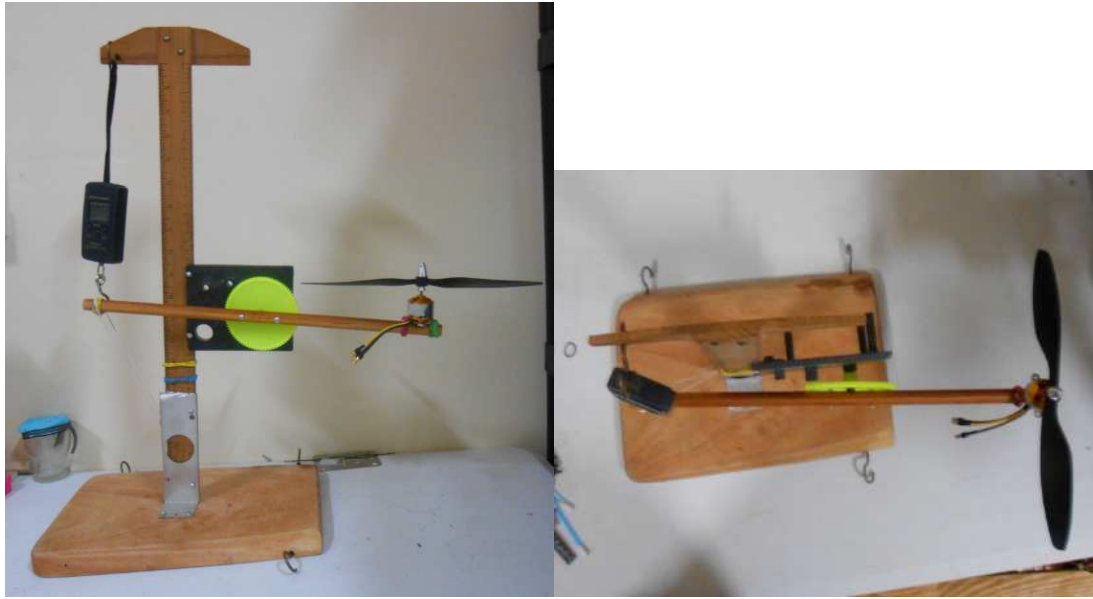


Fig.5.3 Mesa de pruebas.

Por medio de la cual se tabularon las fuerzas producidas de acuerdo al PWM donde en teoría el motor debería dar 1000 RPM por cada volt aplicado, esto en la práctica se debería comprobar obteniéndose los siguientes resultados empleando una tarjeta Arduino nano y conectando el ESC empleando una batería LiPo de 11.1 volts 3s y una hélice CC de 10*4.5. Fig 5.4



Fig. 5.4 Prueba de motores

volts	RPM teórico	Gramos levantados
7	7000	380
8	8000	485
9	9000	595
10	10000	686
11	11000	789

Dado que el peso total del cuadricóptero con la batería, la cámara y el mecanismo de estabilización es de 1095 g y el peso se divide entre los rotores es suficiente para poder emplearlo. Ya que $1095/4$ es menor a 300 gramos por lo cual el sistema debe cargar ese peso sin esforzarse demasiado.

5.2 Pruebas realizadas con diferentes IMUS

Para la realización del proyecto se buscó alguna tarjeta controladora de código abierto de acuerdo al presupuesto se optó por alguna basada en microcontroladores de 8 bits en primera instancia basadas en el microcontrolador Arduino ya que durante la carrera se emplearon algunas y el coste sería menor se desarrolló una tarjeta empleando sensores giroscopios y acelerómetros basados en un circuito integrado comercial económico y de fácil adquisición el gy-6050 del cual existe mucha documentación además se agregó un sensor barométrico para calcular la presión atmosférica y de esta forma estimar la altura. Fig 5.5, para llevar a cabo la comunicación en un principio se realizó por medio de un módulo Bluetooth conectado a 9600 bps y en cuanto al software se empleó el programa Multiwii v 2.1 para comprobar las señales medidas, sin embargo este diseño está muy limitado, los sensores aunque generan señales legibles carece de precisión sobre todo el sensor barométrico que cerca del suelo (alrededor de los 2 a 4 metros) da lecturas erráticas, sin embargo la lectura del giroscopio y del acelerómetro son bastante buenas y se empleó el circuito para seguir haciendo pruebas mientras se conseguía mejores sensores en cuanto al software existe la posibilidad de programar empleando circuitos más precisos sin embargo dado el costo se optó por conseguir una tarjeta diferente.



Fig. 5.5 Lectura de sensores

El primer circuito IMU de prueba se puede ver en la siguiente figura 5.6

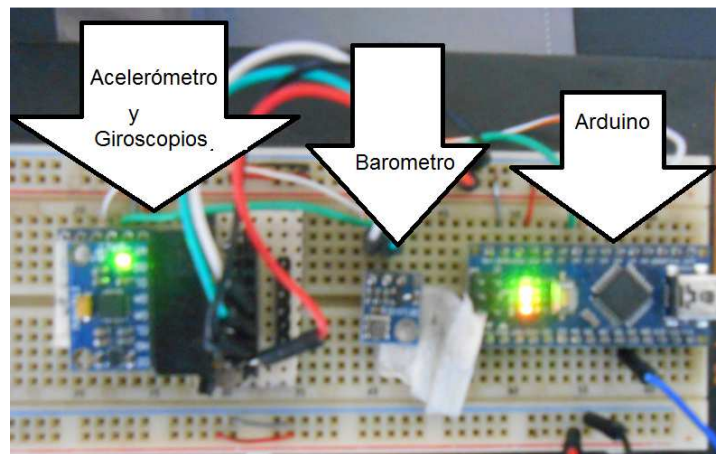


Fig. 5.6 Primer IMU empleado

Una segunda tarjeta controladora que se consideró es la Multiwii Crius 2.5 Fig. 5.7

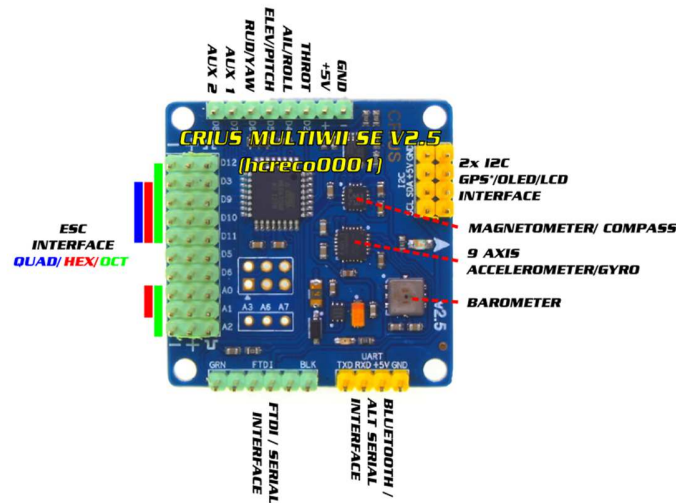


Fig. 5.7 Multiwii Crius 2.5.

Esta tarjeta cuenta con un puerto de comunicaciones UART, puerto I2C para comunicación con sensores así como LCD I2C-GPS NAV, GPS y/o sonar, regulador de 3.3. Filtros para reducir el ruido en la lectura de los sensores MPU6050 giroscopio y acelerómetro de 6 ejes, magnetómetro, un sensor BMP085 de mayor precisión que el empleado anteriormente. Se hicieron pruebas muy satisfactorias, se programó y se implementó un sistema de comunicación vía serial empleando el módulo de comunicación Bluetooth, la comunicación se realizó empleando una librería de Python con el protocolo Multiwii serial protocolo (MSP) el cual se utiliza para mandar instrucciones desde una estación en tierra a este dispositivo, sin embargo es muy pequeño y está limitado a un solo puerto serial, lo cual es un impedimento a la hora de graficar las señales ya que o empleamos el puerto para transmitir las instrucciones de retroalimentación visual o leemos los datos enviados de los sensores, existe una versión más grande de esta tarjeta controladora llamada Multiwii crius AIO (All in one) la cual posee más puertos UART sin embargo se decidió emplear esta tarjeta para controlar el mecanismo estabilizador de cámara el cual se describirá más adelante.

Tarjeta controladora APM Fig. 5.8



Fig. 5.8 Kit Ardupilot 2.5 (APM 2.5)

El kit con el que se trabajó tiene comunicación serial via telemetría a 433 Mhz y un alcance mayor a 500 metros, cuenta con un GPS Neo-6M GPS module with magnetómetro via I2C. Módulo MAVLink-OSD V2.0, y el módulo de alimentación (regulador a 5 volts) para conectar a la batería LiPo, para comunicarnos con la computadora se utilizó un protocolo llamado MAVLink vía telemetría, la tarjeta controladora de vuelo tiene las siguientes características:

La placa trabaja con el microcontrolador ATMEGA2560 y ATMEGA32U-2 para procesamiento y comunicación USB, giroscopio y magnetómetro, memoria flas de 4 MB dentro de la placa para datalogging automático, sensor de presión barométrica modelo MS5611-01BA03.

Sistema estabilizador de cámara mecánico

Es un mecanismo que emplea dos servos uno para el eje X y otro para el Y, este sistema se encarga de compensar ligeramente la vibración de la cámara y los movimientos no deseados para ello emplea giroscopios, con lo que se cancela los movimientos tanto en el eje de las X como en Y moviéndolos en dirección opuesta. Se empleó un estabilizador mecánico para que en todo momento la cámara este mirando perpendicular al plano XY con ello pretendemos liberar de realizar cálculos a la computadora ganando con ello una mayor velocidad en la respuesta de procesamiento además de que de esta forma los cálculos de posicionamiento también serán menores.

Se diseñó un sistema estabilizador para el cuadricóptero ya que los que existen en el mercado son muy caros el primer diseño se realizó en un programa de diseño asistido por computadora y por medio de una impresora en 3D se construyó los detalles se encuentran en el Apéndice 4

También se adquirió un estabilizador comercial el cual se muestra a continuación:

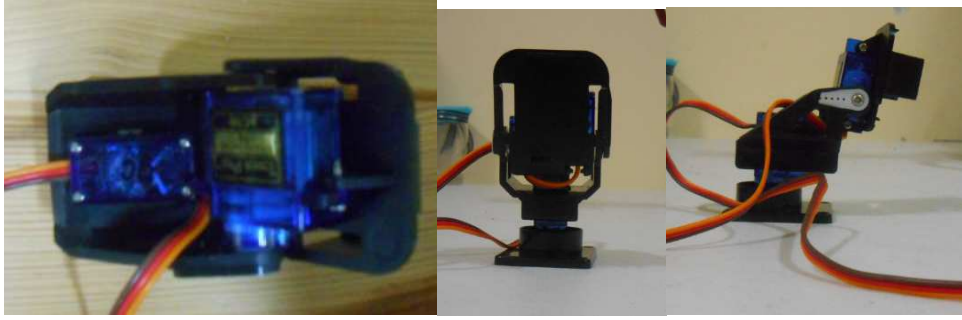


Fig. 5.9 estabilizador de cámara

Las baterías empleadas son 3 (solo una a la vez se utilizó) Fig. 5.10



Fig. 5.10 Baterías LiPo empleadas

Son 2 baterías de 2200 mAh 3s y una batería de 3000 mAh 3s todas de 11.1 Volts

Los ESC empleados son de 30 A Fig. 5.11



Fig. 5.11 ESC empleados

El cálculo de la autonomía de vuelo teórico puede variar al real debido al desgaste propio de la batería la cual con el paso del tiempo va disminuyendo:

Suponiendo que trabajamos a potencia máxima:

El control remoto ocupado para las pruebas es del tipo FS-T6 de 6 canales (se ocupa en caso de algún problema se toma el mando manualmente) Fig. 5.12 y 5.13



Fig. 5.12 Control 6 canales

Receptor:



Fig. 5.13 Receptor de 6 canales

Conexión eléctrica de los componentes 5.14

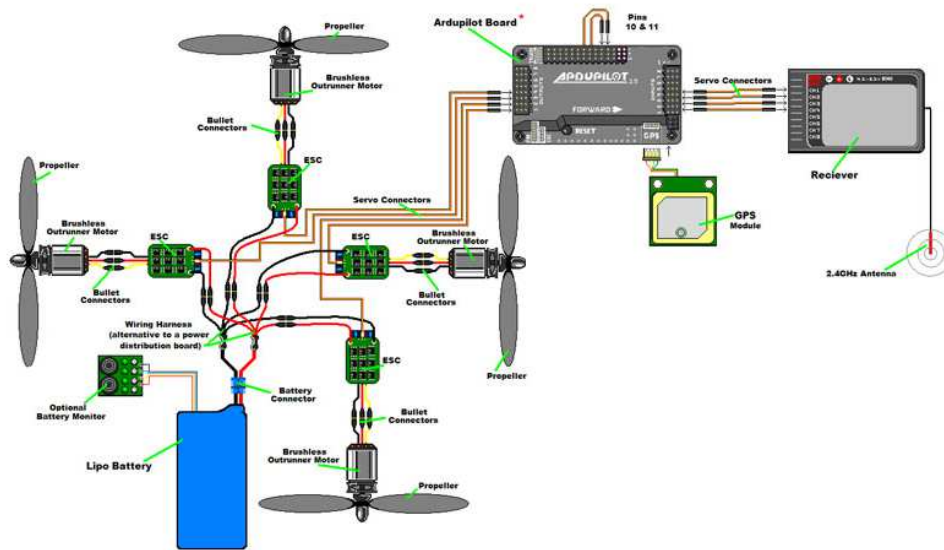


Fig. 5.14 Conexión eléctrica de los componentes

Y el sistema de visión está compuesto por una cámara inalámbrica y un sistema de transmisión inalámbrico que función a una frecuencia de 5.8 Ghz. Fig 5.15



Fig. 5.15 Sistema de transmisión

La conexión del transmisor dentro del cuadricóptero es la Fig. 5.16:

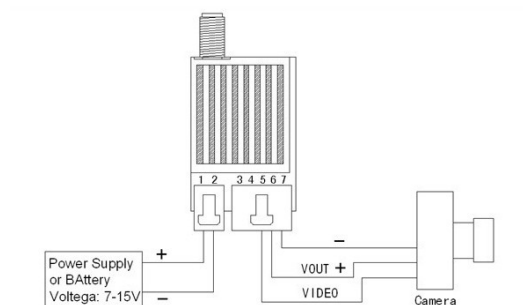


Fig. 5.16 Conexión del transmisor

La cámara empleada fue una Sony con las siguientes características Fig 5.17. y en la Fig 5.18 se muestra cuando está montada en el sistema y en la 5.19 una vista inferior.

RTF 700-line Camera 1/3 Sony CCD

Sensor: 1/3 CCD Sony, 700 lines.

Video format: PAL

Audio: No

Power Input: 12V $\pm 5\%$

-Current consumption: <100ma

Shutter speed: automated 1/50-1/10000 sec

Minimum illuminance: 0.05Lux F2.0



Fig. 5.17 Cámara empleada



Fig. 5.18 Cámara montada.

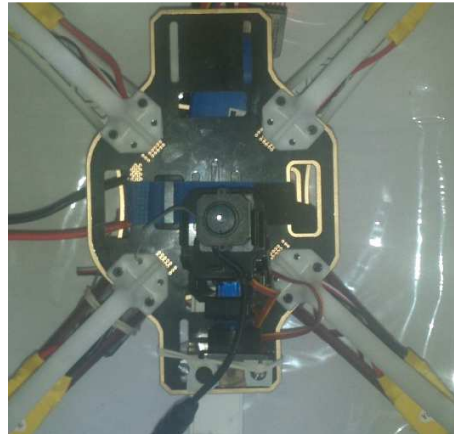


Fig. 5.19 Vista inferior.

Las conexiones de los elementos que conforman la implementación de todo el sistema quedan representados en la Fig. 5. 20.

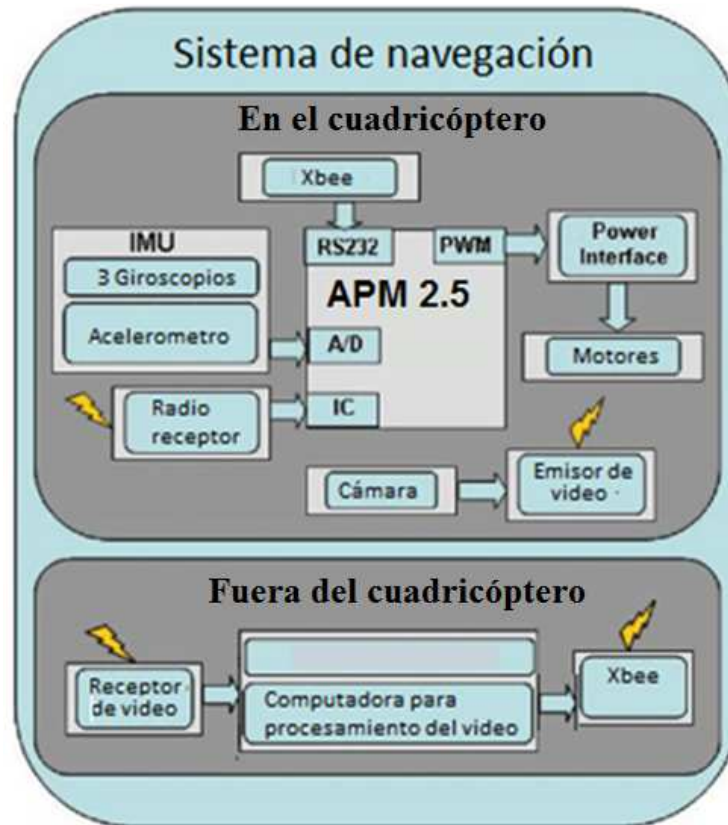


Fig. 5.20 Representación de la implementación del sistema

Y finalmente el prototipo completo se observa en la Fig. 5.21.

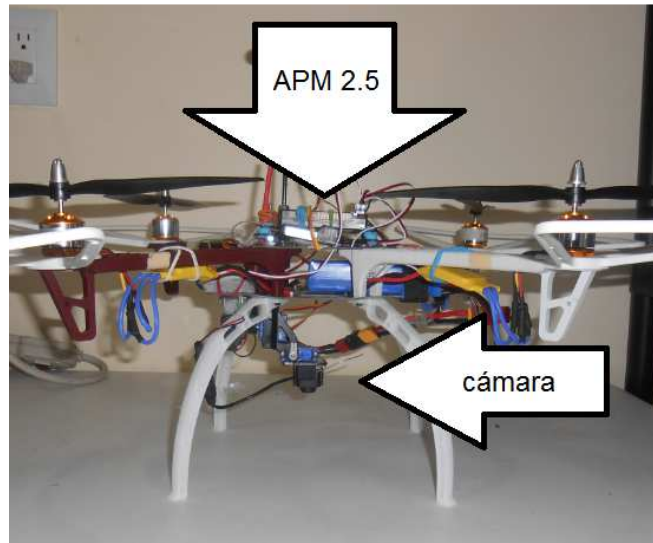


Fig. 5.21 Sistema completo

5.3 Software

5.3.1 Proceso de calibración de la cámara

En primer lugar para la correcta interpretación de los datos obtenidos por la cámara se realizó la calibración obteniéndose los siguientes resultados:

Empleando un patrón de tablero de ajedrez. (Fig. 5.22) y su representación (Fig. 5.23)

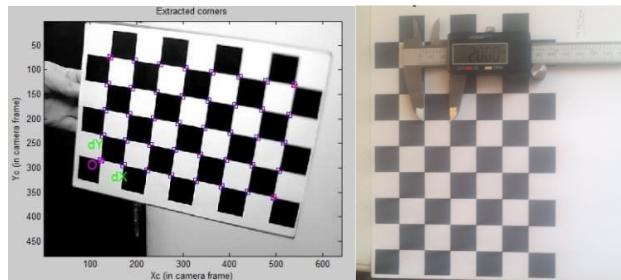


Fig. 5.22 Patrón de pruebas.

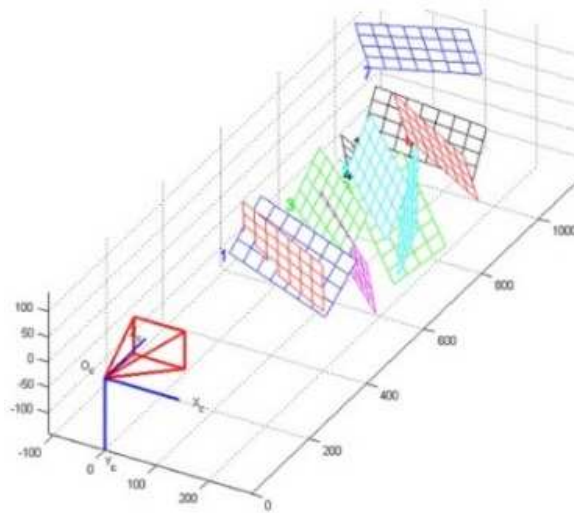


Fig. 5.23 Representación

Una vez obtenidos todos estos parámetros y almacenarlos. Los intrínsecos se dividirán en: la matriz de la cámara, y los coeficientes de distorsión. La matriz de extrínsecos se descompone en 2 vectores: rotación y traslación. La calibración de la cámara se ha realizado con el modelo de la cámara pinhole, obteniendo la matriz de calibración k siendo f la distancia focal.

$$k = \begin{bmatrix} f & 0 & P_x \\ 0 & f & P_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La técnica de visual tracking se implementó en un sistema APM Ardupilot mega 2.6 y la retroalimentación se realizó empleando un protocolo de comunicación conocido como MAVlink, los controladores y valores PID están implementados dentro de la tarjeta. Para controlarla se tuvo que hacer una calibración y ajustes a los motores, y de manera experimental mover el centro de masa al centro del vehículo coincidente con el eje óptico. El

De esta forma el modelo se reduce y empleando el magnetómetro el cuadricóptero se orientara al polo norte magnético de la tierra, manteniendo esta orientación todo el tiempo, permitiendo únicamente los movimientos sobre el plano x y de roll y pitch. Sin girar sobre el eje z. otra propuesta sería implementar un cálculo de odometría monocular siguiendo la metodología anterior. Para poder navegar libremente en un plano se requiere por lo menos de 2 grados de libertad, cada movimiento del cuadricóptero Pitch, Roll y Yaw se considera un grado de libertad para moverse en el plano X Y manteniendo una altura constante se requiere al menos dos de estos elementos. La línea que seguimos fue controlar el movimiento yaw por medio de visual servoing mientras los demás movimientos son controlados de forma manual.

Control de yaw

El movimiento se origina a partir de los cambios de velocidad en cada uno de los cuatro motores, los motores son tipo Brushless y requieren de un controlador de velocidad ESC cada uno.

El movimiento de Yaw (guiñada) es controlado por la retroalimentación de ψ , dicho valor se obtiene de un magnetómetro (central inercial) el error yaw E_ψ , está determinado por la diferencia entre el valor actual y el deseado ψ^* (5.1).

$$E_\psi = \psi - \psi^* \quad (5.1)$$

El error es relacionado al voltaje aplicado a yaw por una ley de control (ecuación 5.2), esta ley se encuentra dentro del cuadricóptero:

$$V_\psi = -(k_{p\psi}^a E_\psi + k_{d\psi}^a \dot{E}_\psi) \quad (5.2)$$

Donde $\dot{E}_\psi$ es la derivada temporal del error yaw, $k_{p\psi}^a$ y $k_{d\psi}^a$ son las ganancias de control.

Lo anterior lo podemos expresar por medio de un diagrama (ver figura 5.25)

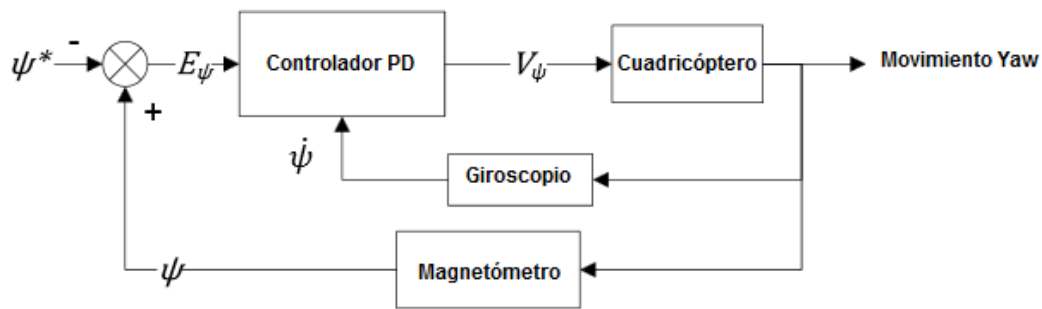


Fig. 5.25 Control de yaw

La idea es controlar únicamente yaw por medio de la información extraída de la cámara como se muestra en la Fig 5.26

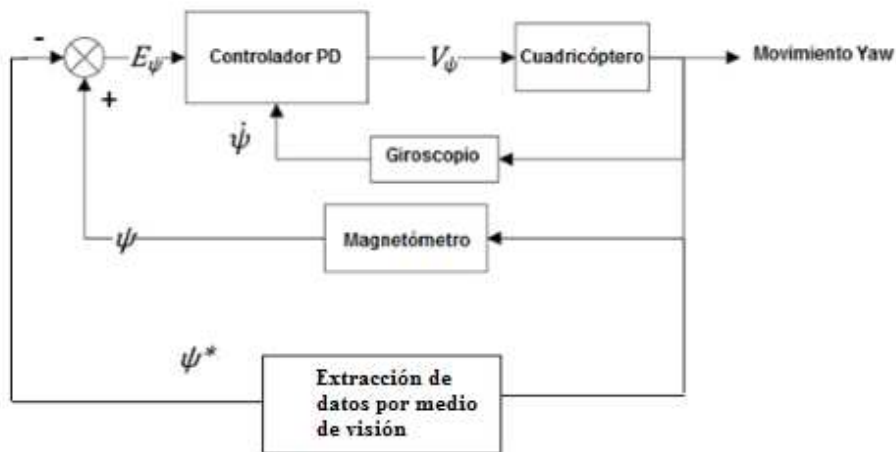


Fig. 5.26 Control a implementar

La técnica de seguimiento de trayectoria empleando retroalimentación visual consiste en seguir una ruta empleando para ello información proveniente de la cámara, la cual generalmente consiste en marcas que pueden estar fijas o también ser móviles como por ejemplo la localización en un campo de futbol de una x, entonces el cuadricóptero busca la x, la localiza y busca llegar a ella minimizando el error de posición que existe entre su posición y la x, hablando en un plano x,y,z requiere mucha precisión.

La propuesta hecha para probar la navegación requiere seguir una ruta trazada en el piso por una línea negra sobre un fondo contrastante con el color negro, esto con fines de investigación. Fig. 5.27

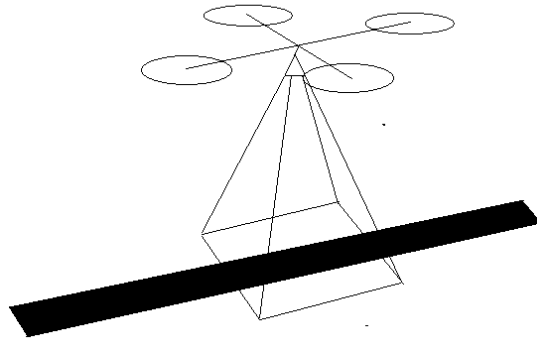


Fig. 5.27 Propuesta seguimiento de trayectoria

Como se mencionó en la sección 3 referente a la cámara monocular, una de las desventajas es la pérdida de información relacionada con la profundidad, la cual solo puede ser conocida a partir de algún objeto conocido y gracias a que conocemos de antemano la anchura de la línea (es constante en todo su trayectoria) podemos estimar la altura Fig.5.28

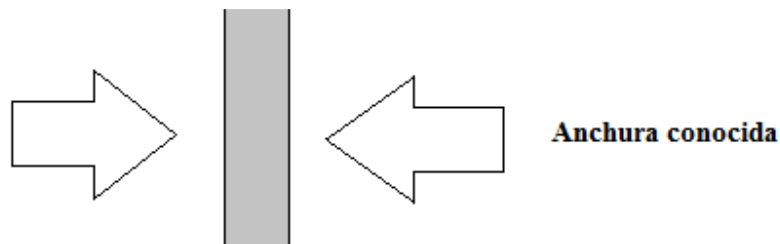


Fig. 5.28 Anchura de la línea

Para evitar percances, el vehículo solo se ha controlado vía telemetría únicamente cuando la cámara tenga a la vista una línea negra y se estime una altura “segura” las pruebas se hicieron a 3 metros aunque esta altura puede ser modificada en un campo abierto, en otras palabras si la línea sale del campo de visión o la anchura de la línea no coincide con la que debería verse a una altura fijada como segura el vehículo entrará en manual con el mando a control remoto, la altura será controla vía control remoto, únicamente se controlará el error de posición en un plano x,y. en un trabajo futuro se controlarán más parámetros como la altura.

La propuesta para el seguimiento de trayectoria se basa en obtener varios puntos dentro de la trayectoria siguiendo un control punto a punto de esta forma se tiene una posición actual y se busca una posición deseada, al llegar a la nueva posición deseada se busca otro punto

que será la nueva posición deseada y así a lo largo de la trayectoria. Fig 5.29

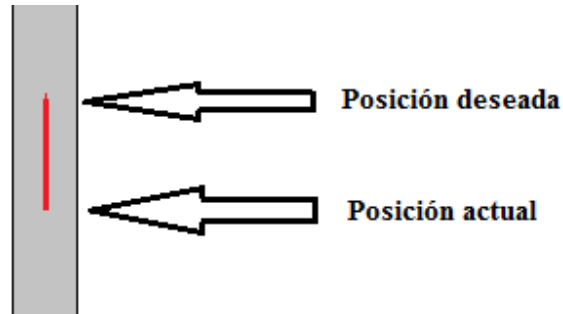


Fig. 5.29 posiciones actual y deseada

Datos conocidos:

La anchura de la línea Fig. 5.30

Y los parámetros de la cámara así como el modelo del robot.

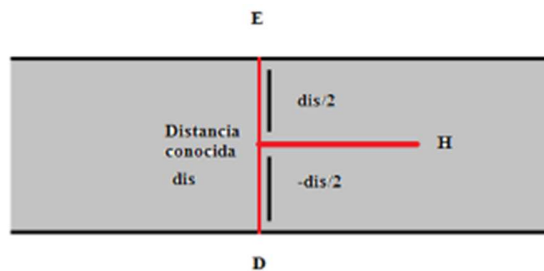


Fig. 5.30 Parámetros conocidos de la línea

La distancia de la anchura de la línea, y la distancia H es generada por un algoritmo donde

F_B frame de la camara

F_l Frame de la linea

También son conocidos roll, y pitch (debido a los sensores)

Descripción de los frames:

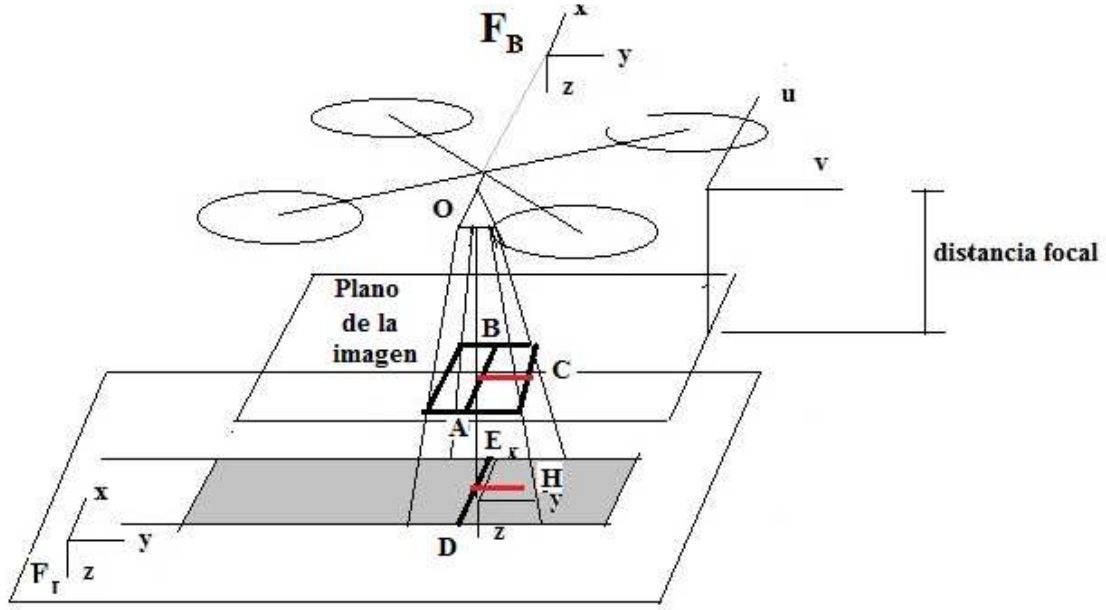


Fig. 5.31 Sistema

Los vectores $\bar{a}$, $\bar{b}$ y $\bar{c}$ se definen como sigue: $\bar{a} = \overline{OA}$, $\bar{b} = \overline{OB}$ y $\bar{c} = \overline{OC}$ y los ángulos $\alpha = \angle AOC$, $\beta = \angle BOC$ y $\delta = \angle AOB$

Para medir la posición relativa del cuadricóptero con respecto a la cámara se lleva a cabo midiendo la distancia desde F_c hasta F_o ,

Empleando el modelo descrito en la sección 3 de la cámara pinhole es como relacionamos las coordenadas de la línea A y B al marco de la cámara

$$u = f_x \frac{x_c}{z_c} + c_x \quad v = f_y \frac{y_c}{z_c} + c_y \quad (5.3)$$

El vector $\bar{a} = \left[\frac{u_1}{f_x}; \frac{v_1}{f_y}; 1 \right]$ y $\bar{b} = \left[\frac{u_2}{f_x}; \frac{v_2}{f_y}; 1 \right]$ estos se conocen debido al procesamiento de la imagen y la calibración de la cámara, sin embargo el vector $\bar{c}$ no se conoce pero se calcula de la siguiente manera:

Conocemos el ángulo, pero se desconoce su magnitud, por la ley de los cosenos sabemos que:

$$\|\overline{OH}\| = \|\overline{OD}\| \cos \alpha = \|\overline{OE}\| \cos \beta \quad (5.4)$$

$$dis^2 = \|\overline{OD}\|^2 + \|\overline{OE}\|^2 - 2\|\overline{OD}\|\|\overline{OE}\|\cos \delta \quad (5.5)$$

$$\|\overline{OH}\| = \cos \sqrt{\frac{dis^2}{1 + \left(\frac{\cos \alpha}{\cos \beta}\right)^2 - 2 \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \cos \delta}} \quad (5.6)$$

Ahora se conoce magnitud y dirección de $\overline{OH}$ necesarios para determinar la altitud relativa

$$z_c^D = \frac{\|\overline{OH}\|}{\|\bar{a}\| \cos \alpha} z_c^E = \frac{\|\overline{OH}\|}{\|\bar{b}\| \cos \beta} \quad (5.7)$$

Finalmente para conocer la altitud relativa de los dos frames tenemos

$$z_c = \frac{z_c^D + z_c^E}{2} \quad (5.8)$$

Y las coordenadas obtenidas a partir del modelo pinhole son:

$$x_c = \frac{u_1 + u_2 - 2c_x}{2f_x} z_c \quad y_c = \frac{v_1 + v_2 - 2c_y}{2f_y} z_c \quad (5.9)$$

El cálculo de yaw se realiza por trigonometría:

$$yaw = \text{atan2}((v_2 - v_1), (u_2 - u_1)) \quad (5.10)$$

La interpolación de trayectoria es la unión sucesiva de puntos en el espacio por donde debe pasar el robot, en este caso el cuadricóptero, Donde la posición esperada por ψ es retroalimentada empleando una configuración cámara en mano y una sola cámara.

Para las pruebas se realizaron simulaciones obteniéndose los siguientes resultados:

Se simuló una línea de 30 centímetros de ancho a una altura definida de 3 metros sobre el piso con los valores siguientes Fig. 5.32:

Gravedad=9.81 N

Masa del cuadricóptero=1.095 Kg

Tiempo de muestreo 0.1 s

Con condiciones iniciales=0

Y valores de sintonización para el PID : $K_P = .85$; $K_I = 0.25$; $K_D = 23.16$;

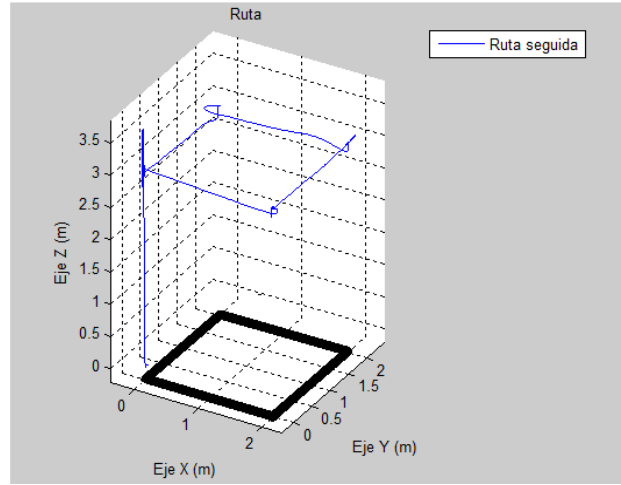


Fig. 5.32 Resultados de la simulación

5.5 Resultados

De la calibración de la cámara fueron obtenidos los siguientes parámetros:

$$\begin{bmatrix} f & c_x \\ f & c_y \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2790 & 325 \\ 2856 & 116 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Antes de realizar el procesamiento de la imagen se aplicaron las transformaciones morfológicas explicadas en el capítulo 3.

Reduciendo el ruido obteniéndose los siguientes resultados Fig. (5.33)

Para enviar la información de la computadora hacia el cuadricóptero se empleó el protocolo de comunicación MAVlink explicado en el Apéndice 5 el cual proporciona librerías para diferentes lenguajes entre ellos Python, el programa de procesamiento se realizó en Python empleando las librerías libres de OpenCV.

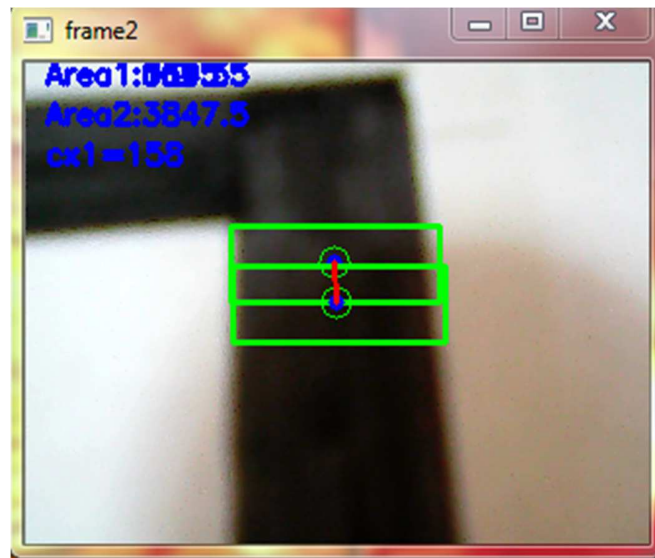


Fig. 5.33 Resultados de la extracción de características de la imagen

Graficando:

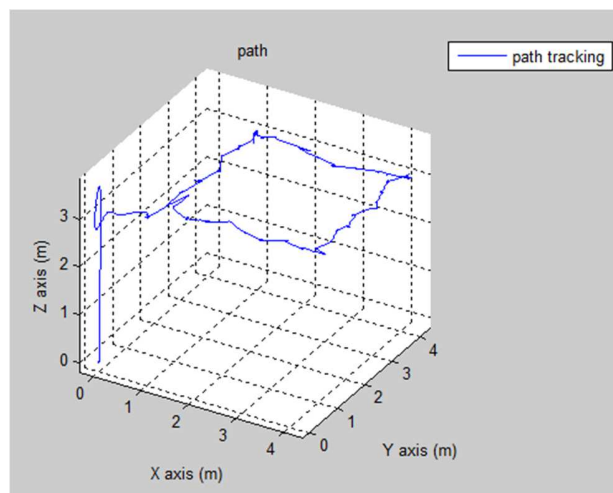


Fig. 5.34 Grafica de resultados

De las gráficas obtenidas podemos concluir que un sistema de visión es perfectamente aplicable en este tipo de robots para ambientes conocidos, y es posible su implementación a todos los grados de libertad del cuadricóptero, lo cual será una mejora de este trabajo en un futuro, una de las razones por la cual se empleó un controlador basado en Arduino y software libre como OpenCV y Python es porque este software es ligero y multiplataforma con ello pretendemos que este proyecto pueda migrarse a otra plataforma pequeña y brindarle autonomía, aún se encuentra en fase de desarrollo.

Capítulo 6 Conclusiones y trabajo futuro

6.1 Conclusiones Generales

La implementación de cámaras como sensores tiene muchas ventajas y desventajas, como ventajas podemos mencionar que nos permite manipular robots en ambientes conocidos, no solo vehículos no tripulado sino brazos robots que puedan interactuar con el entorno reconociendo objetos, así como el área de trabajo, en cuanto a las desventajas podemos encontrar que requiere de una importante capacidad en el procesamiento por parte de la computadora, también tiene un retardo consecuencia de la transmisión de datos así como del procesamiento de las imágenes. La retroalimentación visual nos permite ampliar mucho el panorama de control, ya que por medio de él podemos implementar sistemas embebidos que permitan la autonomía del vehículo, ya sea por ejemplo para incursionar en ambientes desconocidos donde se requiera de la toma de decisiones rápidas por parte del robot, las técnicas de visión nos abre la posibilidad para poder implementarlas en reconocimiento y reconstrucción de ambientes 3d para aplicaciones en cartografía o en búsqueda y rescate localizar personas, hay una amplia gama de posibilidades a partir del procesamiento de imágenes tanto para control como para localización y reconstrucción, por ultimo cabe señalar que no es la única técnica de visión y no es necesariamente la mejor, pues por ejemplo en IBVS no se requiere de los parámetros de la cámara para poder implementar dicha técnica, también existen otras técnicas de visión aplicadas en la industria como lo son (SURF, SIFT, y flujo óptico, los cuales son aplicados actualmente a entornos industriales y no requieren un modelo del objeto de referencia

6.2 Trabajo futuro

Antes que nada, se debe adquirir una tarjeta controladora con mayor capacidad, como una Crius All in one o una PX4 que siga siendo de arquitectura abierta pero que no tenga tantas limitantes, Alguna línea de investigación podría intentar el implementar el sistema a bordo del vehículo de tal forma que pueda ser más autónomo es importante señalar que en gran medida la autonomía en cuanto a la energía depende mucho de la capacidad de carga de la batería ya que en estos momentos por la tecnología actual se limita a pocos minutos, la necesidad de utilizar los 4 motores al mismo tiempo y en todo momento hace que rápidamente se termine la carga, sin embargo con motores que consuman menos amperaje y tal vez reduciendo las dimensiones y el material con el que se construyó el vehículo podría ampliarse el tiempo en vuelo, por otra parte aún se debe desarrollar más tanto el software como el hardware, empezando por una posible computadora a bordo, el software empleado OpenCV es muy potente y en combinación con el desarrollo del control empleando control

difuso, redes neuronales, o un algoritmo genético se pueden mejorar los parámetros del controlador empleado, sin embargo como antecedente cumplió con los objetivos.

Bibliografía

- [1] «Escuela universitaria de ingeniería técnica industrial de Zaragoza,» departamenteo de informática e ingeniería de sistemas, 2007. [En línea]. Available: <http://automata.cps.unizar.es/Historia/Webs/>. [Último acceso: 18 octubre 2015].
- [2] D. Mallo, El maravilloso mundo de la tecnología, Mexico D.F.: Provemex, 1980.
- [3] J. G. d. I. Cuesta, Teminología de la aviación, Madrid: Días de los Santos, 2011.
- [4] E. Martínez, Piloto de RPAS Cuadricoptero - Guía de referencia, España: Hedrich, 2011.
- [5] R. Pawson, El libro del robot, Barcelona: gustavo Gill, 1986.
- [6] M. Najib, A UAV for bridge inspection: Visual servoing control law with orientation limits, Paris Francia: Revista Automation in Constructoin. Vol. 17. Issue 1., 2007.
- [7] J. R. Azinheira, Image-Based Visual Servoing for Vanishing Features and Ground Lines Tracking: Application to a UAV Automatic Landing, portugal: International Journal of Optomechatronics 09/2008; 2(3):275-295 DOI: 10.1080/15599610802303314, 2004.
- [8] I. Mondragón, «Unmanned aerial vehicles UAVs attitude, height, motion estimation and control using visual systems,» *Autonomous Robots*, vol. 29, nº 1, pp. pp 17-34, 2010.
- [9] J. Anderson, Introduction to flight, Singappore: MacGraw-Hil, 2000.
- [10] J. Leishmania, Principles of Helicopter Aerodynamics, New york: Cambridge University Press, 2000.
- [11] G. V. Raffo, Modelado y control de un helicoptero quadrotor, Sevilla: tesis te grado, 2007.
- [12] P. M. y. R. S. Bouabdallah, «Design and Control of an Indoor Micro Quadrotor.,» *In Proc. IEEE Int. Conf. on Rob. and Automat*, vol. 5, p. pages 4393– 4398, 2004.
- [13] T. J. K. y. S. Sastry., Output tracking control design of a helicopter model based on approximate linearization., Florida, USA, 1999.
- [14] M. M. S. y. A. Spazio., «The Hipparcos and Tycho Catalogues - The Hipparcos Satellite Operations.,» *Technical Report ESA SP-1200*, , 1997, vol. 2, nº European Space Agency, 1997.
- [15] A. N. y. R. S. S. Bouabdallah, Dynamic Modelling of UAVs. May 2006., USA: Autonomous Systems Laboratory - EPFL,, 2006.

- [16] R. Olfati-Saber., Nonlinear Control of Underactuated Mechanical Systems with Application to Robotics and Aerospace Vehicles., Massachusetts : PhD thesis., 2001.
- [17] S. Esteban., Control Nolineal en Tres Escalas de Tiempo de un Helicóptero de Radio/Control sobre una Plataforma., Sevilla: Technical report, Universidad de Sevilla., 2005.
- [18] M. C. Murguía, Percepción visual aplicada a la robótica, México: AlfaOmega, 2015.
- [19] M. Goñi, Biblioteca básica electrónica: Robotica, Madrid: Nueva Lente, 1986.
- [20] J. a. P. W. Hill, «Real Time control of a robot with a mobile camera proceedings of the», 9 *ISIR*, vol. 9, pp. 233-246, 1979.
- [21] P. L. P. Pinto, Control visual basado en características de un sistema articulado. Estimación del jacobiano de la imagen utilizando múltiples vistas, Madrid: Tesis, 2007.
- [22] H. G. a. C. P. Hutchinson. S, «A tutorial on visual servo», *control IEEE transaction on Robotics and Automation*, vol. 12, nº 5, 1996.
- [23] S. Chaumette F and Hutchinson, «Visual servo control part 1 Approaches», *Robotics & Autonomos magazine, IEEE* , vol. 14, nº 1, pp. 109-118, 2006.
- [24] E. Sucar, Visión computacional, Puebla.
- [25] Aviastar, «aviastar», aviastar, [En línea]. Available: http://www.aviastar.org/helicopters_end/breguet_gyro.php. [Último acceso: 12 septiembre 2015].

Apéndices:

Apéndice 1 Herramientas matemáticas

Sea una matriz ortonormal R donde:

$$R^T R = I_n$$

Y su derivada en el tiempo es

$$\dot{R}^T R + \dot{R}^T \dot{R} = 0_n$$

Definiendo $S = R^T \dot{R}$

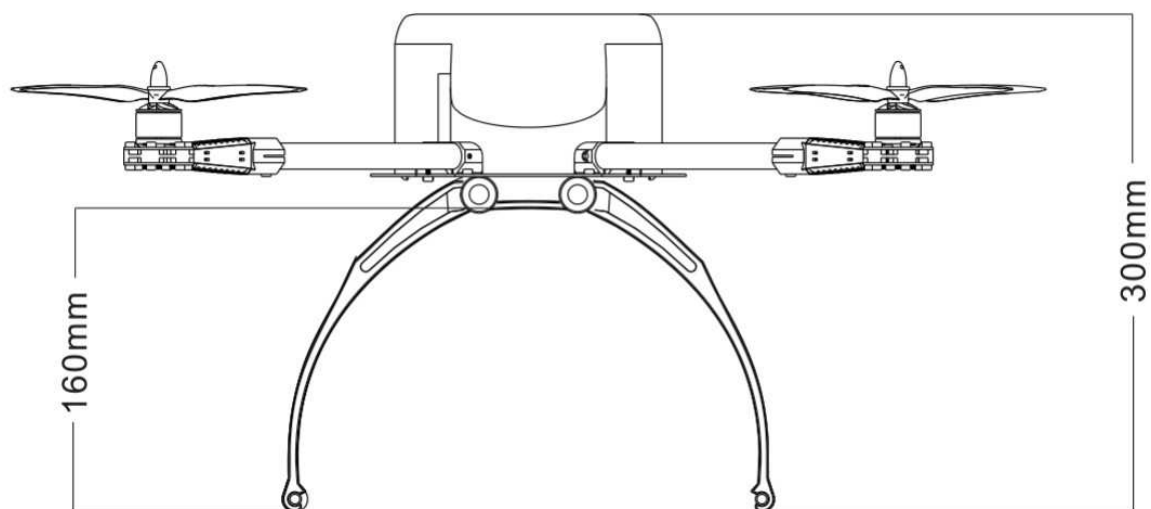
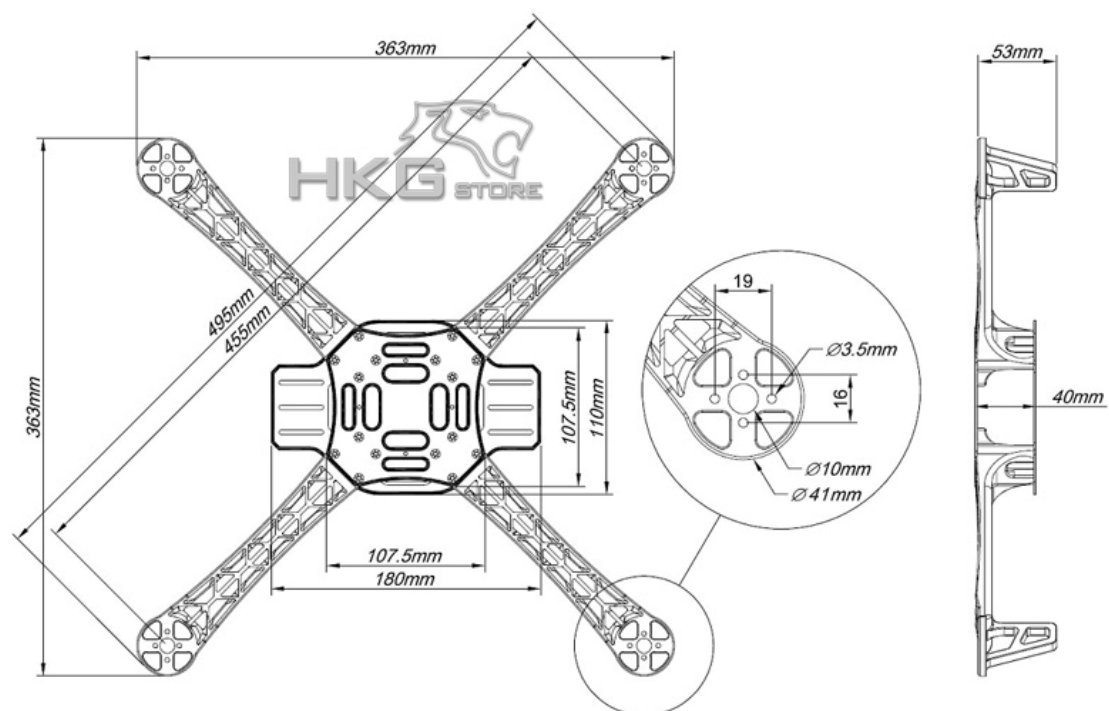
Obtenemos que

$$S^T + S = 0_n$$

Donde S es una matriz anti simétrica, la relación entre la derivada de la matriz ortonormal y la matriz anti simétrica es la siguiente:

$$S = R^{-1} \dot{R}$$

Apéndice 2 Datos de la estructura del cuadricóptero



Apéndice 3 hoja de datos motor brushless

GWS 2212/13T Brushless Motor Instructions:

Usage Notes and Precautions:

Please read detailed specifications and follow instructions carefully

- Optimal motor running power is 100W.
- Do not run motor at high RPM continuously for more than five minutes.
- If motor is running at or over 100 watts, motor temperature will quickly exceed 40°C (104°F) and continue rising.
- Leave enough space around motor for heat dissipation.
- Motor temperature should not exceed 70°C (140°F)

Please visit our website at www.gwsus.com for more information; or contact us at service@gwsus.com

GWS 2212/13T 無刷馬達說明書

使用注意事項

感謝您使用GWS2212/13T外轉無刷馬達，請您在用本產品前仔細閱讀說明書，並按說明書指示正確使用

- 本款馬達額定功率為100W，使用時持續高速不得超過5分鐘
- 當馬達超過100W時溫度會快速升高
- 馬達安裝使用時，務請保留進氣及散熱孔，以確保馬達運轉時散熱
- 馬達溫度請勿超過70°C

熱誠歡迎您對本公司之產品提出意見和建議，請登錄本公司網站www.gws.com.tw；
服務E-mail 以下辦公處：中國：china@gws.com.tw 台灣：service@gws.com.tw

技術規格 Basic Technical Specification

型號 MODEL	測試電壓 Voltage	無負載 NO. LOAD		KV值	尺寸 DIMENSIONS		重量 WEIGHT	
		電流 (安培) CURRENT(A)	速度 (轉速) SPEED (rpm)		軸徑 (公厘) SHAFT (mm)	外觀 (公厘) APPEARANCE (mm)	公克 (g) GRAM (g)	盎司 (oz)
GWSLM003	11.1V	0.4	11400	1030	φ3	φ28	49	1.73

使用參考數據 Operation Reference

PROPELLER 螺旋槳	Volts (V) 電壓	Amps (A) 電流	Thrust 推力		Power (W) 功率	Efficiency 效率		轉速 RPM
			g	oz		g/w	oz/kw	
EP-7035	14.80	5.80	468.00	16.51	85.84	5.45	192.29	14000.00
EP-7060	11.10	9.00	464.00	16.37	99.90	4.64	163.82	9000.00
EP-8040	11.10	6.80	493.00	17.39	75.48	6.53	230.37	9800.00
	14.80	10.90	792.00	27.93	191.32	4.91	173.16	12300.00
HD-8060	11.10	10.30	500.00	17.64	114.33	4.37	154.25	8500.00
EP-9047	11.10	12.30	685.00	24.16	136.53	5.02	176.96	7900.00
EP-9050	11.10	11.00	666.00	23.49	122.10	5.45	192.38	8400.00
HD-9075	11.10	15.20	961.00	33.93	169.72	3.33	117.27	7000.00
EP-1047	7.40	9.20	454.00	16.01	68.08	6.67	235.20	4900.00
EP-1060	7.40	7.80	419.00	14.78	57.72	7.26	256.03	5500.00
	11.10	14.30	694.00	23.42	156.73	4.18	147.54	7200.00
EP-1147	7.40	10.30	468.00	16.44	78.22	6.11	215.64	4300.00
HD-1170	7.40	10.00	480.00	16.93	74.00	6.49	228.78	4700.00
EP-1260	7.40	12.10	508.00	17.92	89.54	5.67	200.10	4000.00
HD-1260	7.40	10.50	499.00	17.60	77.70	6.42	228.51	4600.00

備注：

- 使用電子變速器：GWESC25A
- 測試時間：持續1分鐘
- 白色為推薦型號和使用數據：
淺灰色為高出力但不可長時間連續使用：
深灰色為超額使用，只可在專家級比賽時
瞬間使用。

Remarks:

- Data taken using: GWESC25A
- Test data listed above taken after one minute of high-RPM motor operation.
- White background column shows recommended part / value
Light gray background column shows high output for short operation
Dark gray column shows value only for professional competition and only in short bursts.

PVING-1108-12

How to install this GWS B/L motor shaft.

GWS 2205/15T
GWS 2208/18T
GWS 2212/13T
GWS 2215/12T

建議搭配馬達座 (選配Option)

型號 Model	A(mm)	B(mm)
GWS 2205/15T	51.6	17.5
GWS 2208/18T	54.6	20.6
GWS 2212/13T	58.6	24.5
GWS 2215/12T	61.8	27.4

桿式無刷馬達固定座
Brushless Motor Mount
GWEMM28T (PHCAB-1102→)

桿式無刷馬達固定座 (鋁質)
Aluminum Motor Mount
GWEMM28A (PHCAB-1103→)

Apéndice 4 Estabilizador de cámara

Fig. 2 diseño de estabilizador

81

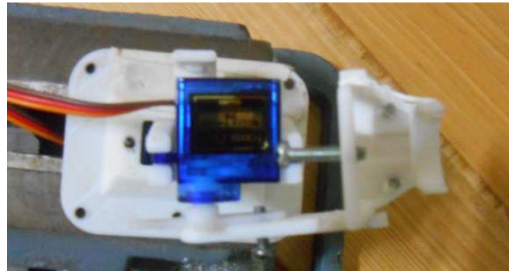


Fig. 3 vista superior

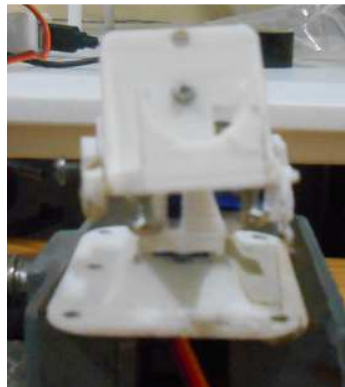


Fig. 4 vista frontal

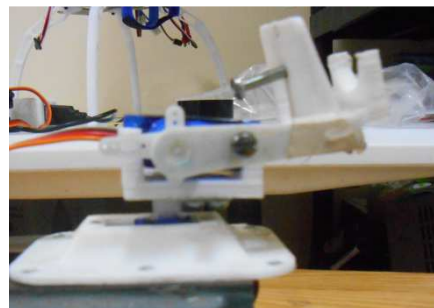


Fig. 5 vista lateral

Apendice 5 Protocolo MAVlink

MavLink es un protocolo de comunicación para MAV (Micro Aerial Vehicles) que hoy en día se ha extendido a todo tipo de vehículos no tripulados (tanto aéreos como terrestres).

Paquete MAVLink

El paquete MAVLink package es básicamente una secuencia de bytes codificados y enviados a través de un transductor (a través de serie USB, radio frecuencia, WiFi, GPRS, etc.). Mediante la codificación se ordena la información en una estructura de datos de *manera*

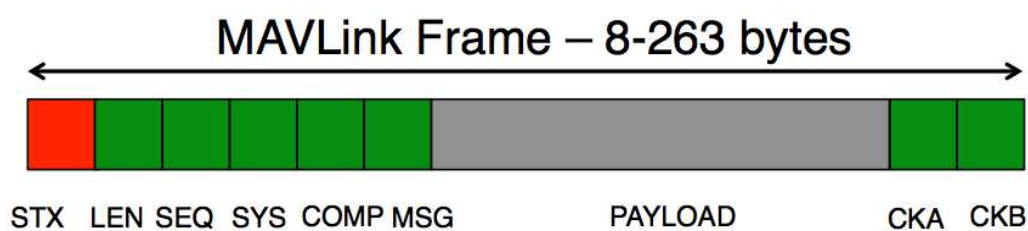
inteligente añadiendo un **checksums (suma de control)**, **número de secuencia** y se envía a través del canal byte a byte.

Partes del mensaje	Byte	Descripción	Valor
Cabecera	0	Indica el inicio de un nuevo mensaje	v1.0:0xFE(v0.9:0x55)
Cabecera	1	Indica la longitud del contenido	0 - 255
Cabecera	2	Número de secuencia, de 0 a 255. Cada componente cuenta con una secuencia de envío. Permite detectar pérdida de paquetes	0 - 255
Cabecera	3	ID del sistema de envío. Permite diferenciar diferentes MAVs en la misma red.	1 - 255
Cabecera	4	ID del componente emisor. Permite diferenciar diferentes componentes en el mismo sistema, por ejemplo. e IMU o el piloto automático	0 - 255
Cabecera	5	ID del mensaje (por ejemplo. 0 = heartbeat) - el id define que <i>significa</i> el contenido y como debe ser decodificado.	0 - 255
<i>contenido</i>	6 - (n + 6)	Contenido del mensaje	(0 - 255) bytes

Checksum	(n+7) to (n+8)	ITU X.25/SAE AS-4 hash, excluido el inicio del mensaje, desde el byte 1..(n+6) Nota: El <i>checksum</i> también incluye MAVLINK_CRC_EXTRA(Número calculado a partir de campos del mensaje. Protege el paquete de ser decodificado de una versión diferente del mismo paquete pero con diferentes variables)	
-----------------	----------------------	---	--

Estructura del paquete

Cada paquete MAVLink está estructurado de la siguiente manera:



La siguiente tabla describe las partes del mensaje y los bytes:

Algunos comentarios:

La suma de control es la misma que utilizan los estándares ITU X.25 y SAE AS-4 (CRC-16-CCITT), documentados en in SAE AS5669A. Por favor, ver el código fuente de MAVLink para un ver un implementación comentada en C.

La longitud mínima de paquete es de 8 bytes para un asentimiento sin contenido.

La longitud máxima es de 263 bytes con el máximo contenido.

Tipo de datos soportados

MAVLink soporta distintos tipos de enteros de tamaño fijo, IEEE 754 flotantes de precisión siempre, arrays de este tipo de dato (por ejemplo `char[10]`) y el campo especial `mavlink_version`, que es añadido automáticamente al protocolo. Estos tipos están disponibles:

`char` - Characters / strings

`uint8_t` - Unsigned 8 bit

`int8_t` - Signed 8 bit

`uint16_t` - Unsigned 16 bit

`int16_t` - Signed 16 bit

`uint32_t` - Unsigned 32 bit

`int32_t` - Signed 32 bit

`uint64_t` - Unsigned 64 bit

`int64_t` - Signed 64 bit

`float` - IEEE 754 single precision floating point number

`double` - IEEE 754 double precision floating point number

`uint8_t_mavlink_version` - Unsigned 8 bit El capo se rellena automáticamente con la versión actual de MAVLink - no puede ser escrito, solo se puede leer del paquete con un campo `uint8_t` normal.

Este protocolo fue totalmente orientado hacia dos propiedades: la velocidad y la seguridad de transmisión. Permite comprobar el contenido del mensaje, también permite detectar la pérdida de mensajes, y solo necesita de 6 bytes de sobrecarga para cada paquete. Algunos ejemplos de transmisión se presentan a continuación:

velocidad de enlace	Hardware	Tasa de refresco	Contenido	Valores <i>Float</i>
115200 baud	XBee Pro 2.4 GHz	50 Hz	224 bytes	56
115200 baud	XBee Pro 2.4 GHz	100 Hz	109 bytes	27

velocidad de enlace	Hardware	Tasa de refresco	Contenido	Valores <i>Float</i>
57600 baud	XBee Pro 2.4 GHz	100 Hz	51 bytes	12
9600 baud	XBee Pro XSC 900	50 Hz	13 bytes	3
9600 baud	XBee Pro XSC 900	20 Hz	42 bytes	10

Apéndice 6 Requisitos de titulación

- A) Publicación en congreso internacional
i) Carta de aceptación

Asociación Mexicana de Software Embebido
13 de Enero del 2016

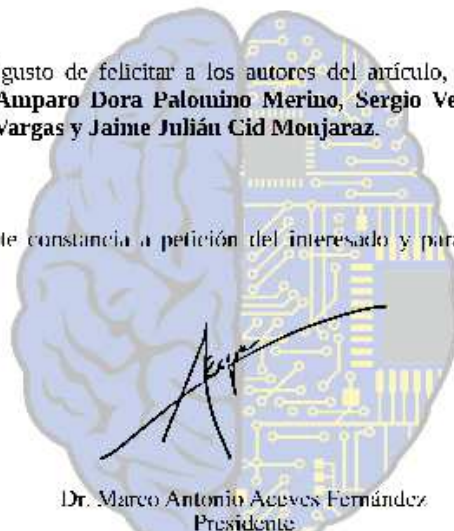
A quien Corresponda,

Por medio de la presente hacemos constar que el artículo denominado: “Quadcopter trajectory tracking using visual servoing”, ha sido aceptado a participar en nuestro magno evento, el Congreso Internacional de Sistemas Embebidos y Mecatrónica.

Este Congreso Internacional tiene como objetivo juntar los profesionistas líderes en el sector de Sistemas Embebidos y Mecatrónica tanto en Academia como en el ámbito Empresarial.

Además, tengo el gusto de felicitar a los autores del artículo, los cuales son: **Pablo Valencia Bibian, Amparo Dora Palomino Merino, Sergio Vergara Limon, María Aurora Diozcora Vargas y Jaime Julián Cid Monjaraz.**

Extiendo la presente constancia a petición del interesado y para los efectos que crea conveniente,



Dr. Marco Antonio Aceves Fernández
Presidente
Asociación Mexicana de Software Embebido

ASOCIACIÓN MEXICANA DE SOFTWARE EMBEBIDO
AMESE

Quadcopter trajectory tracking using visual servoing

Pablo Valencia Bibian, Amparo Dora Palomino Merino, Sergio Vergara Limon,
Maria Aurora Diozcora Vargas, Jaime Julián Cid Monjaraz.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica, Edificio 1FCE76, Ciudad Universitaria
Av. San Claudio y 18 Sur, Colonia Jardines de San Manuel, Puebla, Puebla Tel, (222) 229 55 00 ext. 7405
pabloval2000@yahoo.com.mx, palomino@ece.buap.mx

Abstract—This work exhibits the quadcopter mobile robot control over the yaw movement using visual servoing. To achieve the goal it was adjusted using sensors. At first, mobile robot will remain at a constant height. The images are gotten by the camera and then sent to the computer via wireless where they're processed, it also gets (position and velocity) information, calculates error for subsequent feedback to the microcontroller and thereby moving towards a new desired position.

The prototype structure (frame) is a modified racing model with a flight controller Multiwii 2.4 to which adjustments were made to go through the use of the computer. Open CV was used for image processing, Arduino software was occupied for microcontroller programming using camera on hand mode configuration and a visual servoing control based on the position, mention should be made of practical applications at industrial and research levels of this control type as it can be used locating faults or damages to tanks and pipelines by detecting image changes.

Keywords—camera, quadcopter, visual feedback.

I. INTRODUCTION

The visual servoing refers to a closed loop system that uses visual information (commonly get by a camera) to control a robot movement [1], the term was initiated by Hill and Park in 1979 [2]. We can also classify the visual servoing by the camera position: using stand by camera mode: in this configuration the camera is placed in the robot and it allows watching the robot movement in first person based on the environment observation that surrounds the robot.

Also we can classify the visual servoing according as how we get information based on position based visual servoing (PBVS) and based on image (IBVS). In the first, the main image features are obtained and its position is estimated with respect to the camera, using this values an error signal its generated between the robot position (current position) and the position you want to reach (desired position).

At the second error signal it's defined directly by the image features it contains [3][4].

Nowadays the UAV's (Unmanned Aircraft vehicle) are commonly used in many applications. This motivate us to study different types of control aircraft, besides, advanced technology allows cheaper sensor based in the MEM'S (Microelectromechanical systems) used in the IMU (Inertial Measurement Unit), as well as miniaturization wireless cameras. This allows increasing the chances to get a real information in a more reliable way

One of the advantages of employment cameras is that we venture into un familiar environments, for this reason, one of the project objectives is to dispense the GPS (Global Position System) as a position sensor, giving the responsibility to the optic sensor. Likewise a microcontroller based on ATmega2560 (Arduino Mega) was used to control the vehicle because of its versatility and extensive documentation

A. State of the art:

Nowadays there are several works about quadcopters controlled by visual techniques for location space as for example RANSAC [5], other line of research has the goal to be controlled by vision based on a circular mark to determine the position of the vehicle [6].

Given the capabilities that the quadcopter has to recognize images, it also exist related jobs with structure inspection [7], as well as research and rescue [8]. Also there are used in development of cartographic plans. This are just some of the applications that visual servoing has in this vehicle type, but not only is limited to this options since they can be used as anthropomorphic robot manipulators [9].

II. SYSTEM OVERVIEW

The mobile robot we use its described as an unmanned aerial vehicle with 4 motors coupled in a single plane, it has 6 degrees of freedom, but only to have 4 engines cannot be defined in the same status an independent value for each degree of freedom [10,11]. The 4 engines would be the input variables and give the quadcopter basic movements (Fig. 1).

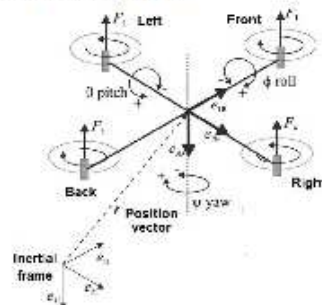


Fig. 1. Basic movements of a quadcopter.

The movement originates from the changes in each engine speed. The methodology for a simple dynamic model that contains the most important information to facilitate the design of a controller can be found in [12].

A. The movement equations

Given Newton's second law we know that the relationship between forces and accelerations of an inertial system is given by the equation:

$$\sum F_e = m \cdot \overline{a_e} \quad (1)$$

Where:

F_e = Represents the sum of all forces acting on the center of gravity

m = is the mass of the rigid body

$\overline{a_e}$ = is the acceleration

In the case of non-inertial reference expression is obtained by:

$$\sum \overline{F_b} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = m(\overline{a_b} + \overline{\omega} \times \overline{v_b}) \quad (2)$$

In a mathematical vector form we can express:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = m \left(\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

Expanding the vector product we have

$$F_x = m(\dot{u} + q\dot{w} - r\dot{v}) \quad (4)$$

$$F_y = m(\dot{v} + r\dot{u} - p\dot{w})$$

$$F_z = m(\dot{w} + p\dot{v} - q\dot{u})$$

From the second law of Euler rotation you have:

$$\sum \overline{M_e} = \frac{dL_e}{dt} = \frac{d(I\overline{\omega_e})}{dt} \quad (5)$$

Which can be expressed in terms of speed, angular accelerations and moments as:

$$\sum M_b = \begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = I \cdot \overline{\dot{\omega}_b} + \overline{\omega_b} \times (I \cdot \overline{\omega_b}) \quad (6)$$

If the inertia tensor is diagonal, it can simplify the development of the equation 6 to get the system of 3 equations rigid rotation:

$$L = I_{xx}\dot{p} + qr(I_{zz} - I_{yy}) \quad (7)$$

$$M = I_{yy}\dot{q} + pr(I_{xx} - I_{zz})$$

$$N = I_{zz}\dot{r} + pq(I_{yy} - I_{xx})$$

B. Yaw Control

The yaw movement is controlled by feedback from ψ , the error in yaw E_ψ . It is determined by the difference between the current and the desired value ψ^* (8).

$$E_\psi = \psi - \psi^* \quad (8)$$

The error (8) it's related to the voltage applied to yaw by a control law (9):

$$V_\psi = -(k_{p\psi} E_\psi + k_{d\psi} \dot{E}_\psi) \quad (9)$$

Where $\dot{E}_\psi$ It's the time derivative of the yaw error, $k_{p\psi}$ and $k_{d\psi}$ are the control gains.

This is expressed by the block diagram shown in Fig. 2.

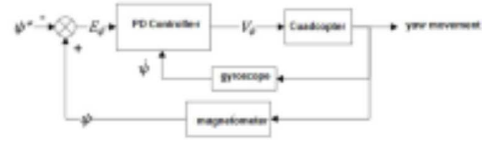


Fig. 2. Yaw motion control.

This movement provides the direction to the vehicle. The roll and pitch control is similar. In general, we can describe the control of a quadcopter as shown in Fig. 3.

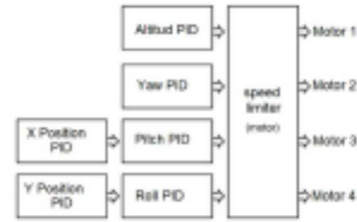


Fig. 3. The description of a control used in a quadcopter.

C. Trajectory tracking

The purpose of trajectory tracking control is to get through a control law that allows the mobile robot to reach and follow the error equal to zero and desired states that vary overtime.

Related to the control strategy, there have been developed a wide variety of algorithms due the fact that the quadcopter model is a multi-variable nonlinear model. Within the proposed algorithms, the Lyapunov based controllers developed by H.Voos[13] and Bouabdallah[14].

III. VISUAL SERVOING

In its simplest form the goal of any control scheme based on vision is to minimize the error $e(t)$ (Fig. 4) in the form shown in (10).

$$e(t) = s(m(t), a) - s^* \quad (10)$$

Where $m(t)$ It's a set of measures characteristics of the image (the image coordinates from a point of interest).

$s[m(t), a]$ It is the vector of visual features

a It's a set of additional system parameters (generally the intrinsic parameters of the system).

s^* They are the desired values of the visual characteristics.



Fig. 4. Basic visual control system.

A. Optical sensor

Since we will control using vision techniques we require an optical sensor and a wireless camera used for this purpose, therefore its description and modeled are studied since this sensor provides information needed to close the control loop and thanks to this the quadcopter it will be positioned in the desired position, this requires to have internal and external parameters necessary to model the camera system.

B. Pinhole Camera Model

The Pinhole camera model [15] describes the mathematical relationship between the coordinates of a 3D point and its projection on the plane of the 2D image (Fig. 5).

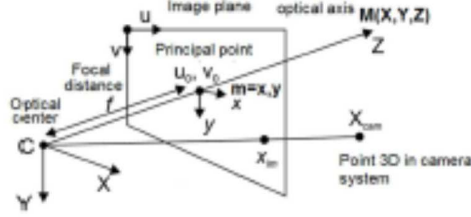


Fig. 5. Pinhole Camera.

The camera performs a projection from a M point in the space to a m point in the image plane through the optical center of the camera, the M point has coordinates (X_c, Y_c, Z_c) . It is represented in the image plane by an m point with coordinates (u, v) , with reference to a central point of the image (u_0, v_0) where the principal point of the camera is on the optical axis thereof at a focal length f from the center of the sensor (11).

$$\frac{v}{X_c} = \frac{u}{Y_c} = \frac{f}{Z_c} \quad (11)$$

Intrinsic and extrinsic parameters:

The m point can be expressed in an alternative way with reference to the upper left edge coordinates x, y (in pixels) by a transformation (12).

$$x = u_0 + f_x u; y = v_0 + f_y v \quad (12)$$

Which it is expressed in matrix form in (13).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Where:

K It's the matrix of intrinsic parameters, which it is a 3×3 matrix that describes both the geometry and the camera optics; f_x, f_y are the focal lengths in x and y respectively.

Of (11) must be:

$$\tilde{q} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = (u, v, 1)^T \quad (14)$$

Where $\tilde{q}$ is a point expressed in projective coordinates.

C. Calibration Camera

Through camera calibration it is as intrinsic and extrinsic parameters are obtained, as well as the distortions of the camera result of its imperfections (radial and tangential). This calibration record is performed when observing an object of known geometry in which a calibration pattern is printed, the camera parameters are estimated from the relationship between three dimensional coordinates and two-dimensional projections obtained in the image plane, the pattern calibration most widely used is a chessboard [16].

IV. SYSTEM DESCRIPTION

The experimental platform consists of different elements which are shown Fig. 6.

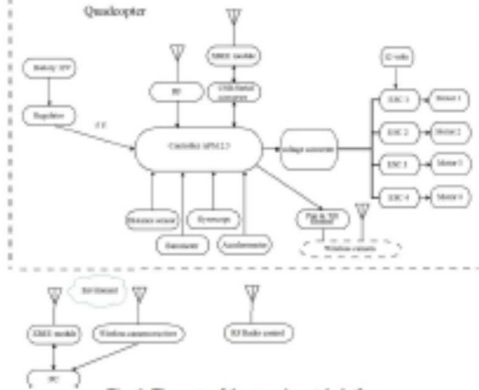


Fig. 6. Elements of the experimental platform.

A. Actuators

We use 4 motors brushless a2212 / 13T 1000KV to generate movement of the propellers.

B. Sensors

Inertial Measurement Unit IMU6000 works with 3.3 volts, for communication uses an IIC protocol, consists of accelerometers and gyroscopes in total has 6 DOF (Degrees Of Freedom).

C. APM Controller Card

The controller card is an APM 2.5 (ArduPilot Mega) based on the ATmega2560 chip, it has 54 ports of entry and configurable output. This is where the controller is programmed.

D. Electronic Speed Controller (ESC)

Brushless motors are three-phase, ESC receive the PWM signal provided by the WAP card and based on this engine provides the energy required.



B) Idioma

i) TOEFL

TOEFL ITP Score Report			
Name of Institution: FACULTAD DE LENGUAS DE LA BUAP			
Name: VALENCIA PABLO		Student Number:	
DOB: 10/18/1980	Sex: M	Degree:	Times Taken TOEFL: None
Native Country: Mexico		Test Date: 04/24/2015	
Native Language: Spanish		Form: TOEFL ITP	
Scaled Scores:		Listening Comprehension: 45	
		Structure & Written Expression: 45	
		Reading Comprehension: 51	
		Total Score: 470	

ETS TOEFL ITP

The face of this document has a security background. The back contains a watermark. Hold at an angle to view.

The TOEFL ITP Assessment Series is designed to be used for placement, progress monitoring, and exit purposes. TOEFL ITP scores can also be used for admissions to programs and institutions where English is not the dominant language of instruction for content courses. Learn more at www.ets.org/toefl_itp/use.

104132-10573 • FB614R100 • Printed in U.S.A. I.N. 770462

Copyright © 2012 by Educational Testing Service.

Student's File Copy
Do Not Copy