

Universidad Aeronáutica en Querétaro



Innovación educativa para el desarrollo de México

---

## TESIS

---

Trabajo Profesional para obtener el Titulo de Ingeniero en Electrónica y

Control de Sistemas de Aeronaves.

Marco Antonio Aguilar Gallardo

Dirige: Antonio Flores

Municipio de Colón, Querétaro

25 de enero de 2020



## DEDICATORIA



## AGRADECIMIENTOS

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.	Uso de una gimbal para una IMU [Grewal, 2007] . . . . .	2
1.2.	Uso de una gimbal en un motor de propulsión [NAS, 2013] . . . . .	3
1.3.	Jerrie Cobb, uno de los Mercury 13, da un giro en la plataforma gimbal. Créditos: NASA . . . . .	4
1.4.	Primer uso de la steadicam . . . . .	4
2.1.	Similitudes entre humano y computadora . . . . .	6
2.2.	El camino que sigue la señal óptica dentro de la cabeza humana. . . . .	7
2.3.	Componentes generales del ojo humano . . . . .	8
2.4.	Formación de una imagen en el ojo . . . . .	9
2.5.	Componentes generales del ojo humano . . . . .	10
2.6.	Nodos conectados al Master . . . . .	11
2.7.	Representación grafica de Topics . . . . .	12
2.8.	Comunicación de mensajes . . . . .	12
2.9.	Odroid XU-4 . . . . .	13
2.10.	Pruebas de performance . . . . .	14

## **ÍNDICE DE CUADROS**



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se expone el objetivo general, así como sus derivados. En la primera sección se aborda el tema de investigación donde especifica la justificación del presente trabajo, posteriormente se sintetiza algunas de las investigaciones que sirvieron como base para la elección del tema previamente descrito. Finalmente se dan las razones de la investigación y se exponen las aportaciones derivadas del tema de tesis.

### 1.1. Tema de investigación

En el campo de la aeronáutica hay una rama que en los últimos años ha sido objeto de estudio debido a su exponencial importancia para tareas críticas, se trata de los vehículos aéreos no tripulados UAV (del inglés unmanned aerial vehicle), donde dichas tareas críticas han podido alcanzar sus objetivos en parte gracias a la implementación reciente de visión artificial, que dicho sea de paso ha dado pie a múltiples investigaciones para generar una buena comunicación de datos entre el UAV y un sistema receptor en tierra, dado que a veces las tareas requieren un tiempo de respuesta menor del que un protocolo de comunicación puede otorgar o en donde se necesita garantizar la seguridad tanto de software y hardware ha surgido la necesidad de diseñar un sistema embebido con la finalidad de evitar los problemas relacionados con los protocolos de comunicación y a su vez tener como resultado un sistema enteramente autónomo.

### 1.2. Justificación

### 1.3. Objetivo

Diseñar, instrumentar y controlar un dispositivo gimbal que sea capaz de seguir un objeto a través de visión artificial para implementarse en un UAV de categoría pequeña a velocidad baja.

## 1.4. Objetivos específicos

- Obtener el modelo matemático de una gimbal de 2 grados de libertad.
- Diseñar e implementar el sistema embebido que dará el soporte electrónico a la gimbal.
- Capturar figuras geométricas definidas mediante el uso de una cámara digital y emplear algoritmos de visión artificial para la obtención de datos.
- Diseñar un controlador autónomo con base en el modelo matemático, previamente obtenido.

## 1.5. Estado de la cuestión

La aparición de la gimbal no es un término para nada nuevo, de hecho es viejo más de lo que muchos podemos creer. Fue en el 250 antes de nuestra era cuando el inventor Philo of Byzantium describió un bote de tinta de ocho lados con una abertura en cada lado, que se puede girar de modo que mientras cualquier cara está en la parte superior, se puede sumergir y entintar un bolígrafo, aunque la tinta nunca se agota a través de los agujeros de los otros lados. [Gim, ].

Desde entonces y hasta la fecha múltiples científicos han desarrollado investigaciones alrededor de dicho artefacto, algunos teniendo más éxito que otros; los cuales serán brevemente expuestos con la finalidad de obtener el estado actual en el que se encuentra la gimbal y su avance tecnológico.

### ■ Navegación inercial

En la navegación inercial, como se aplica a los barcos y submarinos, se necesita un mínimo de tres gimbals para permitir que un sistema de navegación inercial (masa estable) permanezca fijo en el espacio inercial, compensando los cambios en el guiñada, inclinación y balanceo del barco.

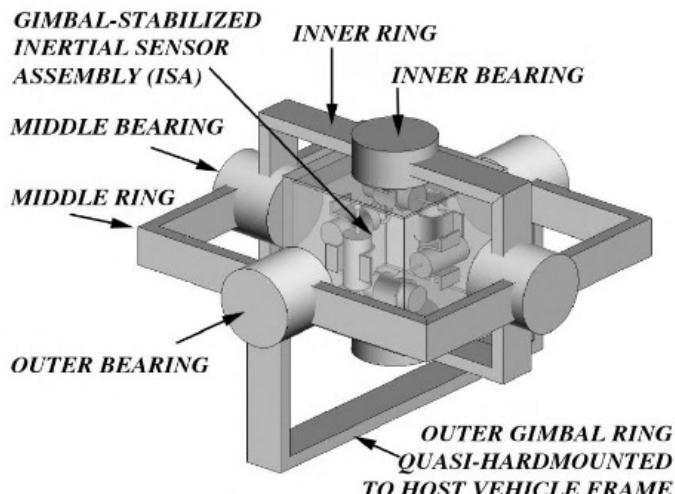


Figura 1.1: Uso de una gimbal para una IMU [Grewal, 2007]

En esta aplicación, la Unidad de medición inercial (IMU) está equipada con tres giroscopios montados ortogonalmente para detectar la rotación alrededor de todos los ejes en el espacio tridimensional. Las salidas giroscópicas accionan motores que controlan la orientación de los tres gimbals según sea necesario para mantener la orientación de la IMU.

#### ■ Motores de cohete

En la propulsión de naves espaciales, los motores de cohetes generalmente se montan en un par de gimbals para permitir que un solo motor logre el empuje sobre los ejes de inclinación y guiñada; o, a veces, solo se proporciona un eje por motor. Para controlar el giro, se utilizan motores gemelos con señales de control de inclinación diferencial o guiñada para proporcionar torque sobre el eje de balanceo del vehículo.

Uno de los motores más famosos es el J-2X. Es un motor de cohete avanzado altamente eficiente y versátil con las características ideales de empuje y rendimiento para impulsar la etapa superior del espacio de la NASA. [NAS, ]

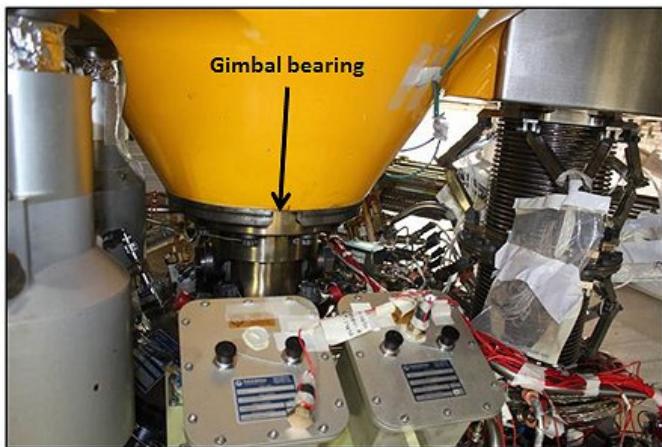


Figura 1.2: Uso de una gimal en un motor de propulsión [NAS, 2013]

#### ■ Entrenamiento para astronautas

Sistema de simulación de maniobras de tipo caída que se pueden encontrar en el vuelo espacial fue creado por la NASA y era conocido como "the gimbal rig,". Tres jaulas tubulares de aluminio podrían girar por separado o en combinación para dar movimientos de balanceo, cabeceo y guiñada a velocidades de hasta 30 revoluciones por minuto, mayores que las esperadas en vuelos espaciales reales. Los chorros de gas nitrógeno, unidos a las tres jaulas, controlaron el movimiento. Desde el 15 de febrero hasta el 4 de marzo de 1960, la plataforma de cardán proporcionó una capacitación valiosa para los siete astronautas del Proyecto Mercurio. Cada uno experimentó unas cinco horas de tiempo de vuelo simulado. [MER, 2017]



Figura 1.3: Jerrie Cobb, uno de los Mercury 13, da un giro en la plataforma gimal.  
Créditos: NASA

#### ■ Estabilizador de Camaras

Los gimbals también se utilizan para montar todo, desde lentes de cámara pequeñas hasta telescopios fotográficos grandes.

En los equipos de fotografía portátiles, se utilizan gimbals de un solo eje para permitir un movimiento equilibrado de la cámara y las lentes. Esto resulta útil en la fotografía semi-profesional, así como en cualquier otro caso en el que se adopten teleobjetivos muy largos y pesados: un eje de la gimbal gira un lente alrededor de su centro de gravedad, lo que permite una manipulación fácil y suave mientras se rastrea a los sujetos en movimiento.

Los montajes de gimbal muy grandes en forma de montajes de altitud-altitud de 2 o 3 ejes se utilizan en la fotografía satelital con fines de seguimiento.

En la década de 1970, el director de fotografía estadounidense Garrett Brown tuvo una idea simple pero revolucionaria: hacer un dispositivo que pudiera suavizar las tomas de acción manuales.



Figura 1.4: Primer uso de la steadicam

El resultado es el Steadicam (Que cumple con los principios físicos de la gimbal) Ganador de un Premio de la Academia, que hizo su debut cinematográfico en la película "Bound for Glory", y se destacó en las películas Rocky y "The Shining"

## **1.6. Contribuciones**

## **1.7. Alcances**

## **1.8. Estructura de la tesis**

## CAPÍTULO 2

### MARCO TÉORICO

En este capítulo desarrolla la teoría que fundamenta el proyecto de investigación con base en el problema previamente descrito.

Antes de entrar a la teoría es necesario entender cuales son las fases del proyecto y el porque de ellas. La siguiente imagen muestra la similitud entre el sistema de adquisición de datos de un humano y la de un sistema digital.

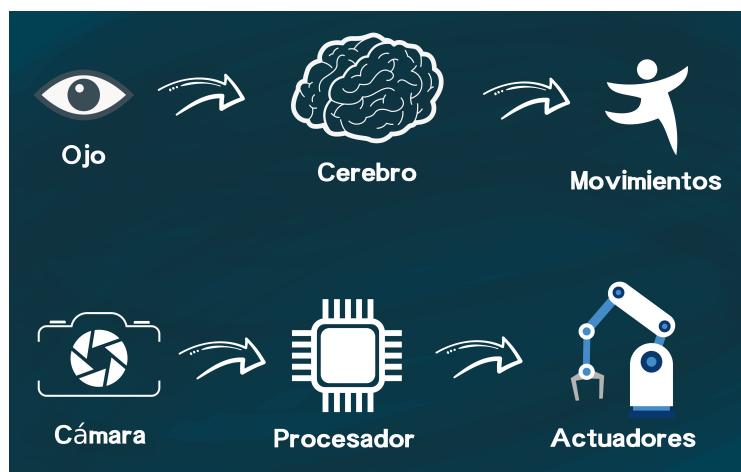


Figura 2.1: Similitudes entre humano y computadora

Donde se observa un diagrama de flujo que empieza con la adquisición de datos, en este caso la captura de una imagen, posterior se hace un procesamiento, es decir, se le da sentido a los datos, y finalmente se hace una acción con base en la tarea que el procesador ha generado.

### 2.1. Óptica

La visión artificial surge de un amplio estudio probabilístico y matemático del procesamiento de imágenes digitales, pero sobre todo de análisis humanos y de la intuición ya que de estas últimas el ingeniero hace selección de entre una u otra técnica. Esta elección

se basa usualmente en juicios visuales subjetivos.

Entender los conceptos básicos de la percepción humana es entonces pertinente, donde la Óptica nos ayudará a entender mejor como es que el ojo humano percibe y como lo hace una cámara.

La función de la óptica de una cámara es captar los rayos luminosos y concentrarlos sobre el sensor sensible de la cámara de video. Después de determinar el tipo de iluminación que mejor se adapta al problema, la elección de una óptica u otra influirá en la calidad de la imagen y el tamaño de los objetos.

### 2.1.1. Descripción general del sistema visual humano

La luz entra al ojo y estimula los sensores en la parte posterior. La señal que se crea luego viaja a través del nervio óptico, cruzando el nervio que proviene del otro ojo y llega a un órgano, en el interior del cerebro en el área del tálamo, llamado núcleo geniculado lateral (LGN). Las salidas de la LGN se envían a la corteza visual en la parte posterior del cerebro. La corteza visual es quizás la parte más compleja del cuerpo humano. Es el lugar en el cerebro donde tiene lugar la mayor parte del procesamiento visual. [Bharath, 2008]

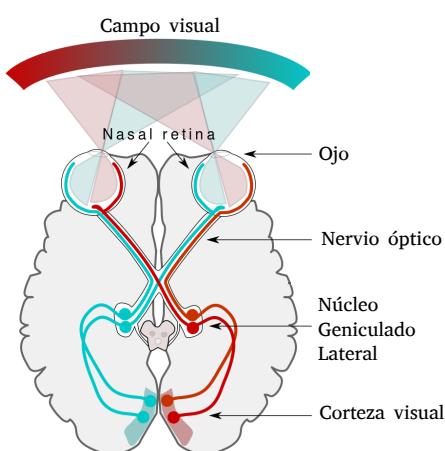


Figura 2.2: El camino que sigue la señal óptica dentro de la cabeza humana.

En términos generales, cuanto más nos alejamos del camino visual del ojo, menos entendemos lo que está sucediendo.

### 2.1.2. Estructura del ojo humano

Es necesario abordar algunos conceptos básicos para entendernos en un futuro, pero sobre todo comprender las similitudes del ojo humano y la cámara, además de analizar limitaciones físicas de la vista humana en los mismos términos que usaremos para nuestras imágenes digitales.

- **Cornea:** La córnea es una estructura del ojo que permite el paso de la luz desde el exterior al interior del ojo y protege el iris y el cristalino. Posee propiedades ópticas de refracción y para garantizar su función debe ser transparente y es necesario que mantenga una curvatura adecuada.

- Esclerótica: Es el recubrimiento exterior blanco del ojo. La esclerótica le da su color blanco al globo ocular.
- Coroides: Es la capa de vasos sanguíneos y tejido conectivo entre la parte blanca del ojo y la retina (en la parte posterior del ojo). Es parte de la úvea y suministra los nutrientes a las partes internas del ojo.
- Cuerpo ciliar: Es una estructura circular que es una prolongación del iris, la parte de color del ojo. También contiene el músculo ciliar, el cual cambia la forma del cristalino cuando los ojos se enfocan en un objeto cercano. Este proceso se denomina acomodación.
- Diafragma Iris: que se expande o contrae para controlar la cantidad de luz que entra en el ojo. La apertura central del iris, llamada pupila, varía su diámetro de 2 a 8mm. El frente del iris contiene el pigmento visible del ojo, y la parte trasera contiene un pigmento negro.
- Cristalino: El cristalino es “la lente” del ojo y sirve para enfocar, ayudado por los músculos ciliares. El cristalino es una lente que actúa como una lente biconvexa, lenticular, flexible y avascular, cuya principal función es la de enfocar los objetos en las distintas distancias correctamente.
- Retina: Es la capa de tejido sensible a la luz que se encuentra en la parte posterior globo ocular. Las imágenes que pasan a través del cristalino del ojo se enfocan en la retina. La retina convierte entonces estas imágenes en señales eléctricas y las envía por el nervio óptico al cerebro.

[Vilet, 2005]

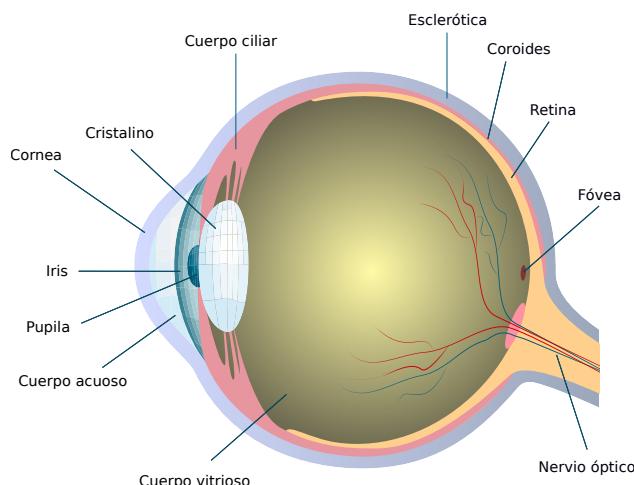


Figura 2.3: Componentes generales del ojo humano

### 2.1.3. Formación de imágenes en el ojo

En una cámara fotográfica se recibe la luz que traspasa el diafragma, pasa por los cristales de la cámara hasta llegar al CCD(Charge Coupled Device o, en español, Dispositivo

de Carga Acoplada) o sensor, que es donde se forma la imagen correcta y se envía al procesador.

Algo similar pasa en el ojo, la pupila es el diagrama natural que filtra la luz que entra en el ojo, pasa por la lente (el cristalino) que converge los rayos hasta llegar a la retina, que es la estructura que tiene las células fotosensibles y dónde se produce la imagen, y a través del nervio óptico se transporta la información al cuerpo geniculado, que es la parte del cerebro donde se produce la visión.

El ojo está formado de dos componentes principales:

- Componentes ópticos: permiten la formación de la imagen en la retina y son los siguientes: la córnea, el cristalino, la pupila, el humor acuoso y el humor vítreo que permiten la formación de una imagen en la retina.
- Componentes neurológicos: son los que transforman la información óptica en eléctrica y transmiten la información al cuerpo geniculado lateral. Estos componentes son la retina y el nervio óptico.

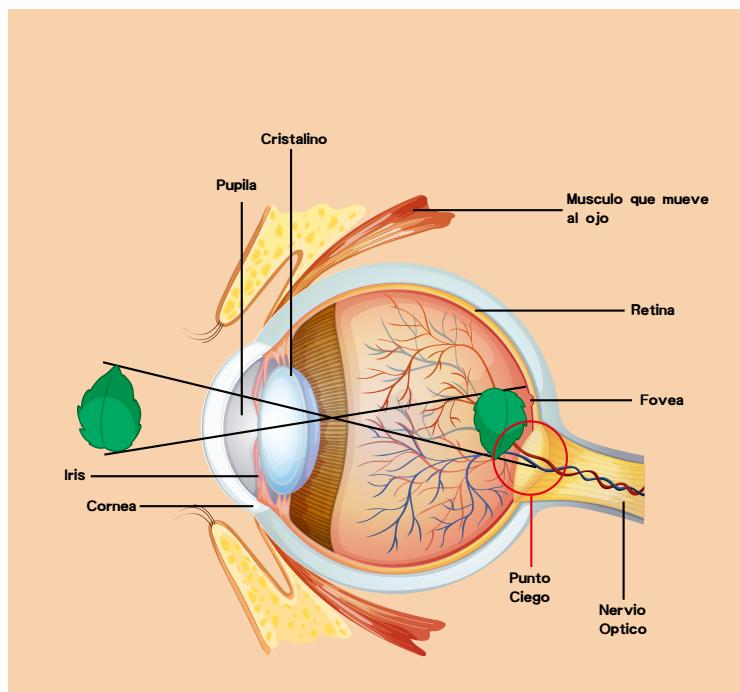


Figura 2.4: Formación de una imagen en el ojo

La principal diferencia entre una lente óptica ordinaria y el cristalino es que este último es flexible, y su forma es controlada por la tensión de las fibras del cuerpo ciliar. Para enfocar objetos lejanos, se aplana, para enfocar objetos cercanos, se ensancha. La distancia entre el centro del cristalino y la retina (que llamaremos distancia focal), varía de aproximadamente 17mm a 14mm. [Vilet, 2005]

Cuando los rayos paralelos pasan a través de una lente convexa, convergen hacia un punto que se denomina punto focal.

Realmente toda lente tiene dos puntos focales según la luz pase en un sentido o en el opuesto. La distancia focal está también relacionada con la cantidad de luz refractada por la lente. Es el denominado factor de potencia D cuyo valor es la inversa de la distancia

focal y su unidad de medida la dioptría.

Otro valor que se encontrará en toda óptica es el número F. Este parámetro indica la relación entre la distancia focal y el diámetro del diafragma:

$$F = \frac{f}{D} \quad (2.1)$$

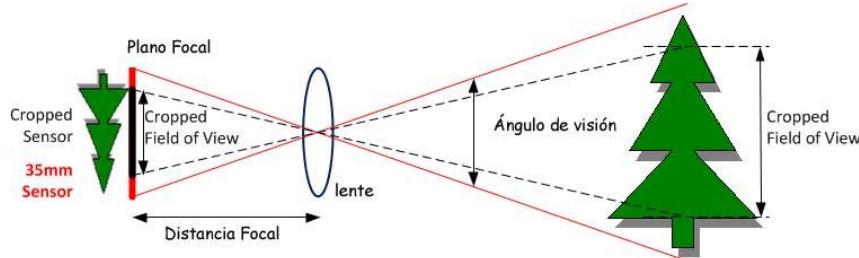


Figura 2.5: Componentes generales del ojo humano

## 2.2. Procesamiento de datos

Este trabajo de investigación se basa en el procesamiento de datos usando un framework llamado ROS (del inglés Robot Operating System).

### 2.2.1. ROS

Un sistema de comunicación es a menudo una de las primeras necesidades que surgen al implementar una nueva aplicación de robot. El sistema de mensajería integrado y probado de ROS ahorra tiempo al administrar los detalles de la comunicación entre los nodos distribuidos a través del mecanismo anónimo de publicación / suscripción. Otro beneficio de usar un sistema de paso de mensajes es que te obliga a implementar interfaces claras entre los nodos en tu sistema, mejorando así la encapsulación y promoviendo la reutilización de código. La estructura de estas interfaces de mensajes se define en el mensaje IDL (Lenguaje de descripción de interfaz).

Decidí usar ROS porque crear un software de robot verdaderamente robusto y de uso general es difícil. Desde la perspectiva del robot, los problemas que parecen triviales para los humanos a menudo varían enormemente entre instancias de tareas y entornos. Hacer frente a estas variaciones es tan difícil que se necesita apoyo de un sistema de comunicación.

ROS tiene tres niveles de conceptos: el nivel del sistema de archivos, el nivel del gráfico de cómputo y el nivel de la comunidad. [ROS, ]

#### 2.2.1.1. Nivel de sistemas de archivos de ROS

Los conceptos de nivel de sistema de archivos cubren principalmente los recursos de ROS que encuentra en el sistema, tales como:

- **Paquetes**

Los paquetes son la unidad principal para organizar el software en ROS. Un paquete puede contener procesos (nodos) de tiempo de ejecución de ROS, una biblioteca

dependiente de ROS, conjuntos de datos, archivos de configuración o cualquier otra cosa que se organice conjuntamente de manera útil. Los paquetes son el elemento de construcción más atómico y el elemento de lanzamiento en ROS. Lo que significa que lo más granular que puede construir y lanzar es un paquete.

### 2.2.1.2. Nivel de gráfico de cómputo ROS

En términos generales, ROS sigue la filosofía de desarrollo de software de Unix en varios aspectos clave. Esto tiende a hacer que ROS se sienta "natural" para los desarrolladores que vienen de un entorno Unix, pero algo criptico.<sup>al principio para aquellos que han usado principalmente entornos de desarrollo gráfico en Windows o Mac OS X. [Quigley, 2015]</sup>

Los sistemas ROS consisten en numerosos programas pequeños informáticos que se conectan entre sí e intercambian mensajes continuamente. Estos mensajes viajan directamente de un programa a otro.

Los conceptos básicos del gráfico de cómputo de ROS son nodos, master, servidor de parámetros, mensajes, servicios, topics y bags, los cuales proporcionan datos al gráfico de diferentes maneras siguiendo la filosofía antes descrita.

- **Nodo**

los nodos son procesos que realizan cálculos. ROS está diseñado para ser modular a nivel de nodo; un sistema de control de robot generalmente comprende muchos nodos.

- **Master**

Un programa intermedio que conecta nodos.

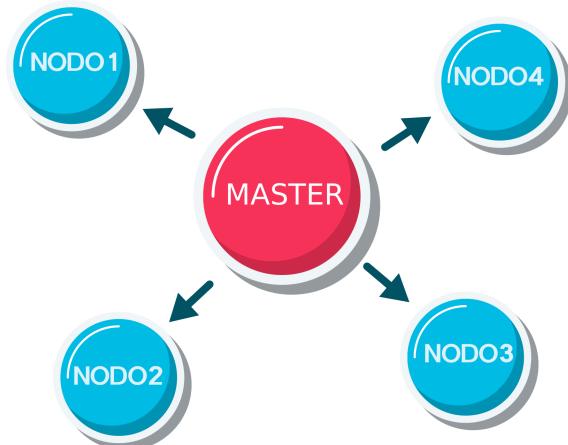


Figura 2.6: Nodos conectados al Master

- **Topics**

Los mensajes se enrutan a través de un sistema de transporte con semántica de publicación / suscripción. Un nodo envía un mensaje al publicarlo en un topic determinado. El topic es un nombre que se utiliza para identificar el contenido del mensaje.

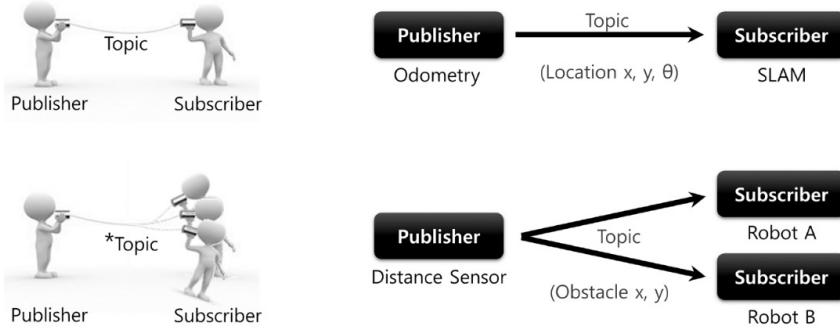


Figura 2.7: Representación grafica de Topics

#### ■ Mensajes

Los mensajes básicamente están pasando por el topic. Hay mensajes existentes basados en tipos de datos predefinidos, y los usuarios pueden escribir sus propios mensajes.

#### ■ Parámetros

El servidor de parámetros permite que los datos se almacenen por clave en una ubicación central. Actualmente es parte del Máster.

#### ■ Servicios

Ya hemos visto ROS Topics, que tiene un mecanismo de publicación y suscripción. El servicio ROS tiene un mecanismo de solicitud / respuesta. Una llamada de servicio es una función, que puede llamar siempre que un nodo cliente envíe una solicitud. El nodo que crea una llamada de servicio se llama nodo Servidor y el que llama al servicio se llama nodo cliente. [Joseph, 2018]

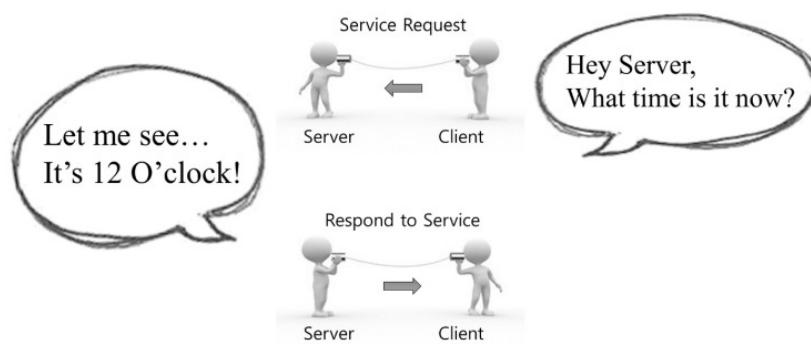


Figura 2.8: Comunicación de mensajes

### 2.2.2. Tarjeta procesadora

Como se abordó anteriormente, ROS es el framework en el cual el proyecto esta corriendo, dicho framework tiene ciertas especificaciones que un sistema operativo debe de cumplir para poder ser instalado. Debido a que el sistema debe estar embebido en un prototipo relativamente pequeño, es decir que no podrá soportar ni la carga ni las dimensiones de un laptop, se definió conveniente la implementación de una tarjeta procesadora, y que dentro de las múltiples opciones del mercado la ODROID fue la seleccionada.

Las placas de la serie Odroid son similares a Raspberry Pi, pero tiene una mejor configuración y rendimiento.

Se basa en la arquitectura ARM. [Joseph, 2018]

ODROID significa Open + Android. Es una plataforma de desarrollo tanto de hardware como de software.

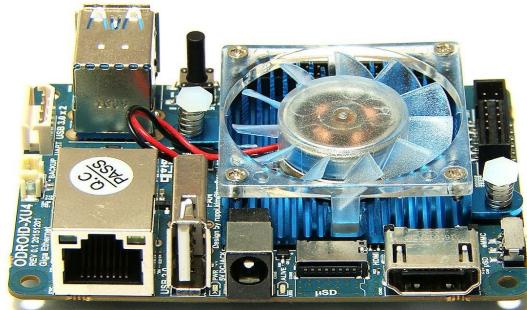


Figura 2.9: Odroid XU-4

El modelo XU-4 cuenta con las siguientes especificaciones:

■ **Procesador**

Samsung Exynos5422 Cortex<sup>TM</sup>-A15 2Ghz and Cortex<sup>TM</sup>-A7 Octa core CPUs con Mali Mali-T628 MP6 GPU.

Es un procesador móvil que fue lanzado en 2014 por Samsung para su celular S5.

■ **Almacenamiento**

Hay dos tipos de almacenamiento de el sistema operativo. El primero es usando una microSD y el segundo es utilizando un modulo eMMC.

■ **Alimentación**

Es necesario alimentar con 5V y con un minimo de 4A para su optimo funcionamiento.

■ **Perifericos**

- USB hosts
- HDMI
- Ethernet RJ-45
- GPIO (Entradas y salidas de SPI,ADC e IRQ)
- Comunicación serial
- USB 3.0

[HardKernel, 2017]

Con base en pruebas hechas por el proveedor, el modelo XU-4 resulta ser superior a otras tarjetas de desarrollo del mercado.

Ejecutaron varios puntos de referencia para medir la potencia informática en el XU4. Las mismas pruebas se realizaron en el Raspberry Pi 3 Modelo B, ODROID-C1 +, ODROID-C2 y ODROID-XU4. Los valores de los resultados de la prueba se escalaron uniformemente para fines de comparación. Se midió que la potencia informática del XU4 era 7

veces más rápida que la última Raspberry Pi 3 gracias a los núcleos 2Ghz Cortex-A15 y un ancho de banda de memoria de 64 bits mucho mayor.

Compilar código en el XU4 es súper rápido. La memoria RAM DDR3 de 2 GB de alto rendimiento es una ventaja adicional que permite compilar la mayoría de los programas directamente en el XU4. [HardKernel, 2020]

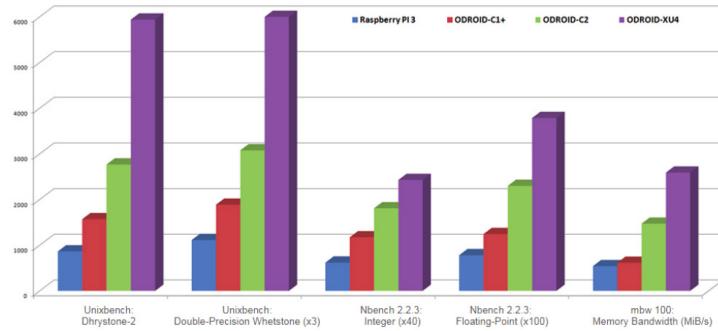


Figura 2.10: Pruebas de performance

### 2.2.3. Sistema operativo

Una vez elegida la tarjeta de desarrollo con la cual se estará trabajando para este proyecto, el siguiente paso es escoger el sistema operativo que dará soporte a nuestro sistema. Por defecto ODROID nos sugiere utilizar Ubuntu en su versión MATE.

#### 2.2.3.1. Ubuntu MATE

Ubuntu MATE es una distribución de Linux gratuita y de código abierto y un derivado oficial de Ubuntu.

Ubuntu es uno, si no es que el más grande, empleador de Linux en el mundo. Linux está en el corazón de Ubuntu y hace posible crear sistemas operativos seguros, potentes y versátiles.

Ubuntu MATE toma el sistema operativo basado en Ubuntu y agrega el MATE Desktop. Donde podemos definir MATE Desktop como una implementación de la metáfora del Desktop hecha de un conjunto de programas que se ejecutan en la parte superior de un sistema operativo de computadora, que comparten una interfaz gráfica de usuario (GUI) común. Las GUI de escritorio ayudan al usuario a acceder y editar archivos fácilmente. [Ubuntu, 2014]

Ubuntu soporta arquitecturas armhf, tipo de arquitectura de la odroid, además de optimizar el sistema operativo sin sacrificar las ventajas que provee para una Computadora Portátil.

## CAPÍTULO 3

---

### MODELO MATEMATICO

En esta sección se analizara el modelo matemático que rige al sistema, pasando por diferentes marcos de referencia, inercial, de la gimbal y de la camara.

## CAPÍTULO 4

---

### VISION ARTIFICIAL

## BIBLIOGRAFÍA

- [Gim, ] Gimbal. <https://playlists.net/artists/gimbal>. Accessed: 2020-01-10.
- [NAS, ] Nasa's j-2x rocket engine development. <https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/j2x>. Accessed: 2020-01-10.
- [ROS, ] Ros/concepts - ros wiki. <http://wiki.ros.org/ROS/Concepts>. Accessed: 2020-01-10.
- [NAS, 2013] (2013). gimbal bearing – liquid rocket engines (j-2x, rs-25, general). <https://blogs.nasa.gov/J2X/tag/gimbal-bearing/>. Accessed: 2020-01-10.
- [MER, 2017] (2017). The gimbal rig mercury astronaut trainer. <https://www.nasa.gov/centers/glenn/about/history/mastif.html>. Accessed: 2020-01-10.
- [Bharath, 2008] Bharath, A. (2008). *Next Generation Artificial Vision System*. Artech House.
- [Grewal, 2007] Grewal, M. S. (2007). *Global Positioning Systems, inertial navigation, and integration*. Wiley.
- [HardKernel, 2017] HardKernel (2017). *ODROID-XU4*. HardKernel.
- [HardKernel, 2020] HardKernel (2020). Odroid xu-4.
- [Joseph, 2018] Joseph, L. (2018). *Robot Operating System for Absolute Beginners: Robotics Programming Made Easy*. apress.
- [Quigley, 2015] Quigley, M. (2015). *Programming Robots with ROS*. O'Reilly.
- [Ubuntu, 2014] Ubuntu (2014). What is ubuntu mate?
- [Vilet, 2005] Vilet, J. R. M. (2005). *Apuntes de Procesamiento Digital de Imágenes*. Facultad de Ingeniería UASLP, first edition.