

Introducción: Aviación autónoma no tripulada

El Vehículo aéreo no tripulado (UAV)

El UAV es un vehículo aéreo no tripulado donde el control del vehículo es completamente autónomo. A diferencia de la conducción por carretera, en el aire es completamente viable automatizar el control, las ventajas de un vehículo sin piloto humano son evidentes: gran flexibilidad en cuanto a dimensiones de la aeronave, capacidad de asumir riesgos que con un piloto humano serían inasumibles y consecuentemente reducción drástica de los costes.



Los mercados cambian y es fácil imaginar que en unos años gran parte de la aviación comercial será no tripulada como sucede actualmente con la aviación militar. Desde las aplicaciones como el transporte de mercancías hasta las más sencillas de vigilancia reducirán los costes con sistemas no tripulados.

El concepto del UAV tiene varias décadas pero es ahora con el desarrollo de los microcontroladores (pequeños ordenadores completos en un solo encapsulado) y de los sensores inerciales de tecnología de estado sólido cuando es posible fabricar estas máquinas a un precio asequible.

Innovación:

A medida que la tecnología evoluciona, aquello que antes solo era posible mediante tecnologías y presupuestos militares hoy es factible con materiales y tecnologías disponibles en el mercado a precios altamente competitivos.

Aunque, en la práctica, los UAVs no atraviesan nuestros cielos, el hecho es que a estas alturas del desarrollo tecnológico el implementar un sistema de guiado no tripulado no supone una innovación en sí. La documentación existente sobre este tema es abundante.

Sin embargo es evidente que en el desarrollo de los UAVs queda mucho por trabajar, y el hecho que lo demuestra es que esta tecnología no se ha introducido en el mercado civil. Para que esto suceda es necesario rediseñar el concepto UAV militar y adaptarlo al mercado civil:

- Dotar a la avionica de gran capacidad de decisión sobre distintos aspectos del vuelo y emergencias en ausencia de comunicaciones con tierra.
- Eliminación completa de los mandos tradicionales del avión (puesto de mando remoto)
- Eliminación de la necesidad de transmisión de video, antenas direccionales...
- Garantizar la seguridad tanto de la aeronave como de la población en caso de fallo del link de datos.
- Gran sencillez en la gestión de la misión

La verdadera innovación consiste en desarrollar la tecnología que aporte la fiabilidad, simplicidad, economía... que permita aplicar un el concepto UAV al competitivo mercado civil.

Aplicaciones:

Las aplicaciones son infinitas, es sencillo hacer una larga lista de aplicaciones:

- **Investigación, educación y formación** - Plataforma ideal y de coste contenido para infinidad de desarrollos y líneas de investigación relacionadas con el control y dinámica del vuelo, la navegación aérea, propulsión, experimentación a gran altitud... (Es fundamental captar la atención del sector educativo y en especial de la UPV donde su joven titulación de aeronáutica cursa su tercer año)
- **Transporte de mercancías aéreo de bajo coste** - El eficiencia energética del vuelo puede ser muy superior a la del transporte por carretera, sin embargo el transporte aéreo actual tiene un coste muy elevado debido a la velocidad de vuelo (muchas veces condicionada por aspectos laboral de la tripulación) y el costoso mantenimiento.
- **Control de trafico por carretera**
- **Policial**, vigilancia policial ciudadana - Sobrevuelo a media altura y potentes cámaras motorizadas.
- **Vigilancia forestal** y prevención de incendios.
- **Vigilancia fronteriza** y costera.
- **Fotografía aérea** - agrícola, inmobiliario...
- **Filmación de video aéreo** - Productoras de TV, Prensa rosa?, no hay que negar que seria un sector interesado y que mueve mucho dinero en todo el mundo.
- **Desastres, emergencias, búsquedas de personas** - A diferencia de la aviación general, la aviación no tripulada tiene la propiedad de volar durante largos periodos de tiempo a baja velocidad por lo que el UAV no deja de vigilar la zona durante días, por ejemplo una búsqueda de personas desaparecidas pondría permanecer día y noche mediante cámaras de infrarrojos lo cual multiplicaría la eficacia de la búsqueda.
- **Telecomunicaciones** - seudo-satélite de comunicaciones de emergencia o de uso puntual. (volando a mínima velocidad puede permanecer días en el aire haciendo círculos sobre una misma posición a gran altitud)
- **Agrícolas** - fumigaciones, siembras...
- **Publicitario** - Llevando pancartas o escribiendo mensajes con humo.
- **Humanitario** - Transporte de material humanitario a zonas de alto riesgo.
- **Militar** - Finalmente haré mención a las aplicaciones militares que son el origen de esta tecnología y que todos conocemos por las noticias en TV, en los últimos años se están desarrollando aviones de un gran nivel de sofisticación como el X-45 de Boing que pretende sustituir a los actuales aviones de caza tripulados, complejas aplicaciones que no son objetivo de nuestro proyecto.

Objetivo:

El objetivo es desarrollar un sistema autónomo no tripulado para cualquier aeronave (aviones, helicópteros, dirigibles...) y posteriormente desarrollar aeronaves específicas para aplicaciones concretas.



Fases del Proyecto:

Fase 1: Implementación del sistema de guiado autónomo de vehículo aéreo no tripulado: Sistema de navegación inercial Strap-Down con sensores inerciales de estado solido.

Fase 2: Controlador de misión inteligente a bordo SURVIVAL.

Fase 3: Diseño y construcción de vehículos aéreos para las aplicaciones específicas.

Imagen y repercusión mediática:

La naturaleza del proyecto garantiza una alta visibilidad a nivel mediático: Notas de prensa, conferencias en eventos tecnológicos o aeronáuticos, noticias en publicaciones tecnológicas, retos de distancia, altura y participación en eventos aeronáuticos y competiciones...

Como se puede imaginar, el UAV, debido a su potencial táctico, tiene capacidades propias de captar la atención de los medios que no tienen muchos otros proyectos deportivos o tecnológicos.

Viabilidad y capacidades del grupo de desarrollo:

- Capacidad propia de desarrollo de software embebido (microchip 16, 18, dsPIC, Philips LPC2xxx ARM7... y sobre Windows (Microsoft .NET frameworks)
- Capacidad de diseño electrónico, fabricación PCB profesionales
- Capacidad de diseño mecánico 3D, Solidworks, Rhinoceros...
- Capacidad de mecanizado CNC propia (solo prototipado).

Experiencia en aeromodelismo, contactos con la aviación deportiva valenciana.

Colaboraciones:

Debido a la repercusión mediática del proyecto la colaboración puede resultar interesante para empresas tecnológicas relacionadas con el proyecto.

Otro interesante objetivo de las colaboraciones es la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) donde hace 3 años se inicio la titulación de ingeniería aeronáutica.

Conclusión:

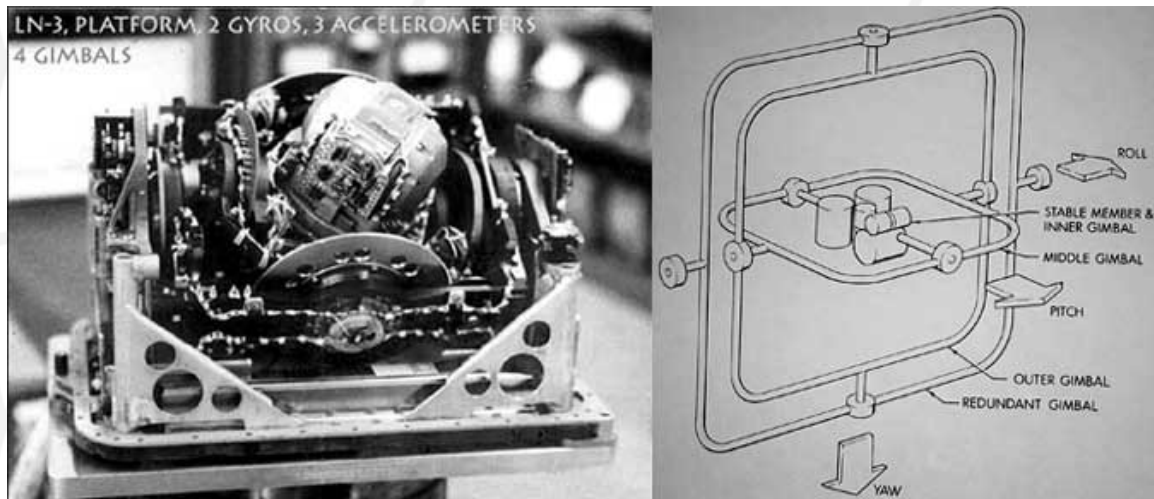
Es un proyecto ambicioso, con un alto potencial de crecimiento a medio plazo y basado en tecnologías disponibles y cuyo éxito a nivel técnico esta asegurado con un presupuesto moderado.

En el aspecto comercial el potencial del proyecto es enorme tanto a nivel nacional como internacional. La relación con empresas e instituciones interesadas en aplicar la tecnología es fundamental para el éxito del proyecto.

Implementación del sistema de guiado autónomo de vehículo aéreo no tripulado: Sistema de navegación inercial Strap-Down con sensores inerciales de estado sólido.

Un poco de historia

Los primeros sistemas de navegación autónoma se remontan a la segunda guerra mundial y las famosas bombas V1 y V2 alemanas. En aquellos días la electrónica era escasa al borde de inexistente y sin embargo disponían de sistemas de guiado que cometían un error pequeño en un viaje de larga distancia. El método que usaban estas bombas de largo alcance es el conocido como Sistema de Navegación Inercial (INS Inertial Navigation System), en él existen unos sensores inerciales (giroscopos y acelerómetros) a partir de los cuales podemos calcular la posición con respecto al punto de lanzamiento (ni que decir tiene que no existía el GPS).



La unidad de medidas inerciales (IMU Inertial Measurements Unit) era un complejo sistema mecánico con motores, volantes de inercia y pesados acelerómetros mecánicos.

El Strap-down INS

El sistema strap-down es una simplificación mecánica del método "gimbaled" anteriormente descrito, en el sistema strap-down, los acelerómetros están rigidamente montados sobre el fuselaje y giran con él y no flotantes como en el "gimbaled".

Para tener una idea más clara trata de entender en qué consiste el método tradicional, unos giroscopos mecánicos (de los de motor y volante de inercia) mantienen alineado el sistema con respecto a la tierra (el conjunto flota sobre rodamientos), de manera que cuando el avión rota en algún eje el sistema sigue alineado y es muy fácil medir la desalineación para corregirla si es necesario, es un sistema fundamentalmente mecánico que no requiere de ningún cálculo, el guiado puede ser analógico o incluso mecánico. La desventaja de este sistema es el peso y el coste.

El Strap-Down es un método desarrollado para la tecnología actual, (microcontroladores con gran potencia de cálculo y sensores de estado sólido), El Strap-Down es completamente diferente en su construcción, tecnología, peso... pero obtiene el mismo resultado.

La desventaja del método strap-down es la gran potencia de calculo que necesita, mientras que el método "gimbaled" obtenía directamente los datos de actitud del avión (ángulo de ataque, alabeo...) los giroscopos del strap-down nos dan solo la velocidad angular de rotación en cada eje, por lo que esta debe de ser integrada para obtener el ángulo. El algoritmo se complica increíblemente cuando se introducen el resto de sensores que están implicados en la navegación inercial (acelerómetros pero también otros sensores no inerciales como altura barométrica, posición GPS...)



Navegación Inercial

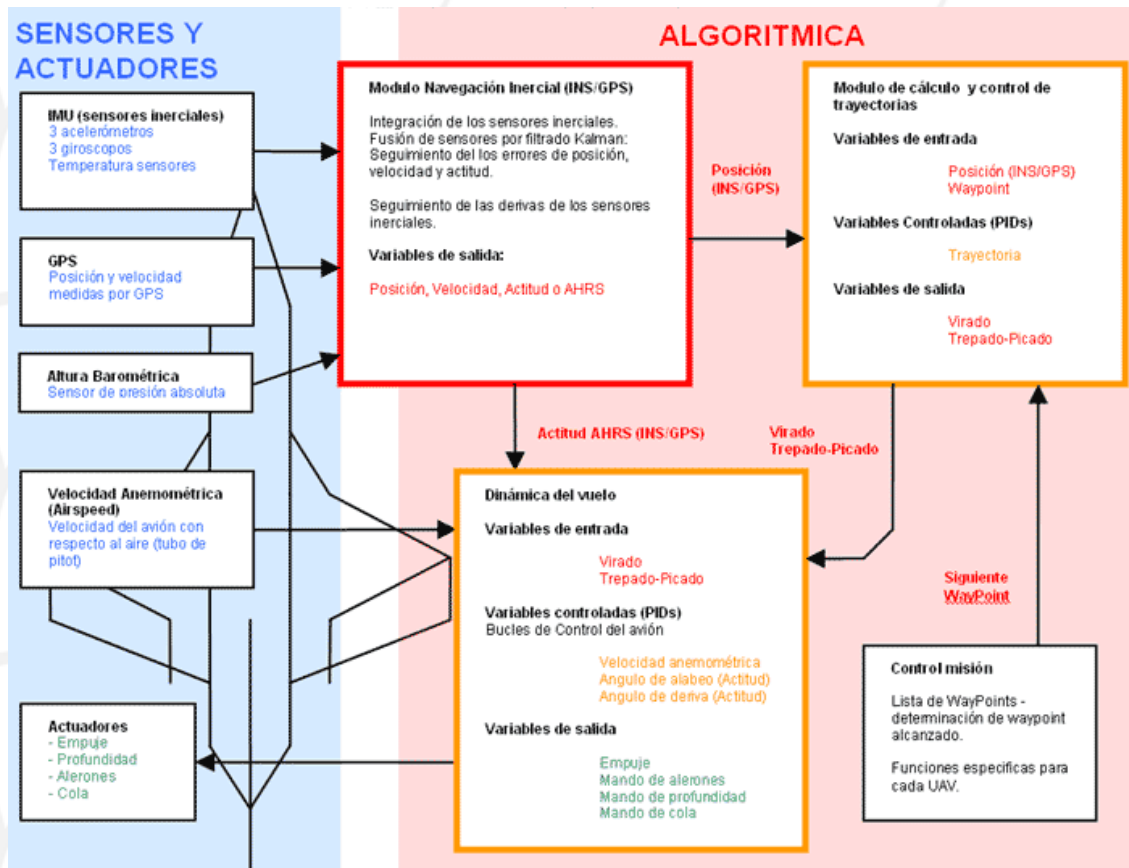
Hasta este punto queda claro que la base de la navegación y el guiado son los sensores inerciales. Pero hoy en día tiene poco sentido un sistema de navegación inercial puro por la existencia de tecnologías como el GPS.

El sistema de navegación inercial (INS) es el algoritmo en el cual se calculan todas las variables del vuelo:

- Por una parte las referentes a la inclinación de los ejes del avión con respecto al eje de referencia "tierra", lo que llamaríamos horizonte artificial o mas técnicamente AHRS (attitude and Heading Reference system)
- y por otra parte el sistema de posicionamiento, posición y velocidad del avión.

No parece lógico que disponiendo de GPS tengamos que calcular la posición a partir de unos acelerómetros!

El algoritmo INS (inertial navigation system) se basa en una herramienta matemática llamada filtro Kalman. El filtro kalman trata de hacer un seguimiento de las señales de aceleración, velocidad y posición y de sus errores (lo que de desvían estas medidas o las variables que de ellas se calculan).



En este punto vamos a meter la señal del GPS, el GPS se usa para hacer un calculo de la desviación de las medidas y por tanto sirve para corregir estas medidas. Este algoritmo inercial asistido por GPS de llama INS/GPS.

¿porque no se usa directamente la señal del GPS?, la señal de GPS que vemos ya esta muy procesada por un algoritmo basado en Kalman (la señal original es muy ruidosa), este algoritmo nos da una señal normalmente a 1HZ (hasta 10Hz para GPS militares pero no por ello mas precisa que la de 1HZ), lo cual no es suficiente para establecer ningún bucle de control. Sin embargo la señal del GPS (1hz y 5m de error) es increíblemente buena para hacer un seguimiento del error de las medidas inerciales, de esta combinación sacamos una señal a 500Hz (si la velocidad de proceso nos diese) de aceleración lineal, velocidad lineal, posición global, aceleración angular, velocidad angular y posición angular del avión, un buen churro de datos que nos permiten hacer cualquier estrategia de control.

En cualquier caso tiene que quedar claro que los datos de GPS SOLO se usan para calcular los errores del modulo de navegación inercial.

A la posición calculada por este algoritmo se le llama posición (INS/GPS), a las velocidades, Velocidad (INS/GPS) y a todos lo referente ángulos y velocidades angulares se le llama ACTITUD o AHRS (AHRS Attitude and Heading Reference Systems, la traducción al español podría ser horizonte artificial)

Todos estos datos se envían a los módulos que establecen los bucles de control para pilotar el avión, por una parte el AHRS se envía al modulo de dinámica del vuelo que se encarga de mantener el avión nivelado, mantener las velocidades... digamos que este modulo esta a los mandos del avión. Mientras que la posición (INS/GPS) se envía al modulo de trayectorias, rumbos o como quieras llamarlo, que mira donde esta el avión, a donde tiene que llegar y decide si tiene que virar y posteriormente le dice al modulo de dinámica del vuelo cuanto tiene que virar, subir, bajar...

A continuación se profundiza un poco mas en el tipo de calculo que realiza el algoritmo:

Descripcion de las partes fundamentales de la navegacion inercial.

((Los siguientes textos son una traducción de la pagina de Tom Pycke <http://tom.pycke.be/>)))

¿Que es una IMU?

Una IMU (iniciales de Inertial Measurement Unit) es imprescindible en todo buen autopilot. Básicamente podrías verlo como una "caja negra" que te da información acerca de la posición y de la orientación del aparato.

Pero como funciona esta "caja negra"? Pues esta caja lleva dos tipos de sensores:

- Los acelerómetros, en total lleva 3 acelerómetros en los ejes XYZ, como recordaras de la clase de física la gravedad es una aceleración por lo que los acelerómetros te dan las tres componentes del vector gravedad! Conociendo que el vector gravedad es supuestamente perpendicular a la superficie terrestre es fácil calcular nuestra orientación con respecto a tierra. Sin embargo como estamos volando las aceleraciones debidas a los giros nos alteran la medida del vector gravedad. Como resultado este vector solo resulta correcto si hacemos una media de un periodo largo de tiempo.
- Los giroscopos, lleva dos o 3 giroscopos, estos sensores miden la aceleración angular, con la aceleración angular podemos calcular la velocidad angular (integrando) y con la velocidad podemos calcular directamente el ángulo (integrando otra vez) para saber la orientación con respecto a tierra. Parece ideal sin embargo estos sensores tienen ruido y deriva (se descalibran) y después de tanto calculo no es posible obtener datos con una mínima precisión, solo funciona en periodos de tiempo muy pequeños para luego desviarse mucho de la medida correcta.

Si has prestado atención veras que hemos calculado la orientación por dos métodos diferentes, en uno solo es valida y muy estable para periodos de tiempo muy grandes y en otro es precisa y rápida pero valida para periodos de tiempo muy pequeños.

Entonces podemos juntar estas dos medidas para tener una buena medida siempre???, SI! para esto se usa una herramienta llamada filtro Kalman, desde los pequeños misiles guiados hasta los grandes aviones de pasajeros usan este método que el Dr Rudolf E. Kalman enuncio en el 1960 y a la que la NASA encontró rápidamente aplicación.

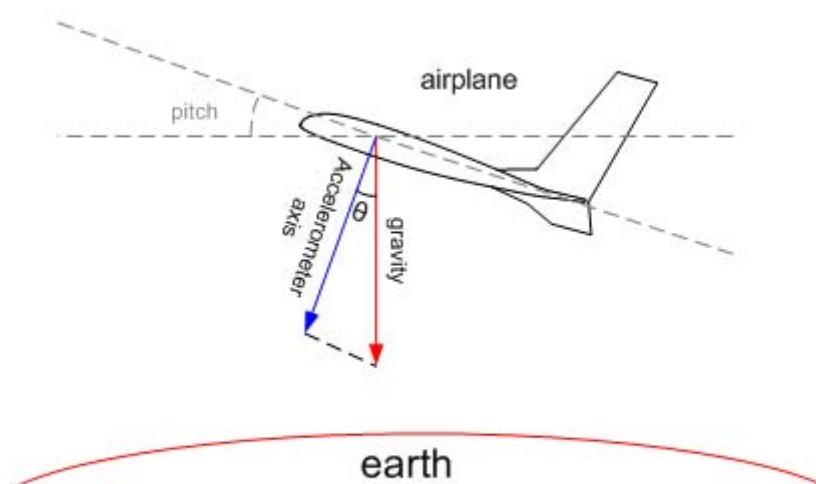
AHRS (Attitude and Heading Reference System)

En este apartado se describe muy simplificado el tipo de calculo que se hace con los sensores de la IMU para obtener los angulos del AHRS.

Acelerómetros.

Este apartado se describe, de una manera practica, como el acelerómetro puede ser usado para determinar la orientación (solo el ángulo de ataque y el alabeo).

Como decíamos anteriormente con el acelerómetros nosotros podemos medir la aceleración de la gravedad.



La flecha roja indica la aceleración de la gravedad. La flecha azul indica lo que el acelerómetro esta midiendo a causa de la gravedad, Nota que el eje del acelerómetro es perpendicular a el avión.

El ángulo theta es el ángulo entre la dirección del vector gravedad y la dirección del eje de nuestro acelerómetro. El ángulo de ataque del avión es igual a theta por lo que calculando theta con unos pequeños cálculos trigonométricos tenemos calculado el ángulo de ataque.

$$\text{accelerometer} = \cos(\text{theta}) * \text{gravity}$$

$$\text{theta} = \arccos(\text{accelerometer} / \text{gravity})$$

Esto es un ejemplo simplificado en un plano 2D, en la practica se calculan los dos ángulos a la vez operando directamente con los vectores 3D.

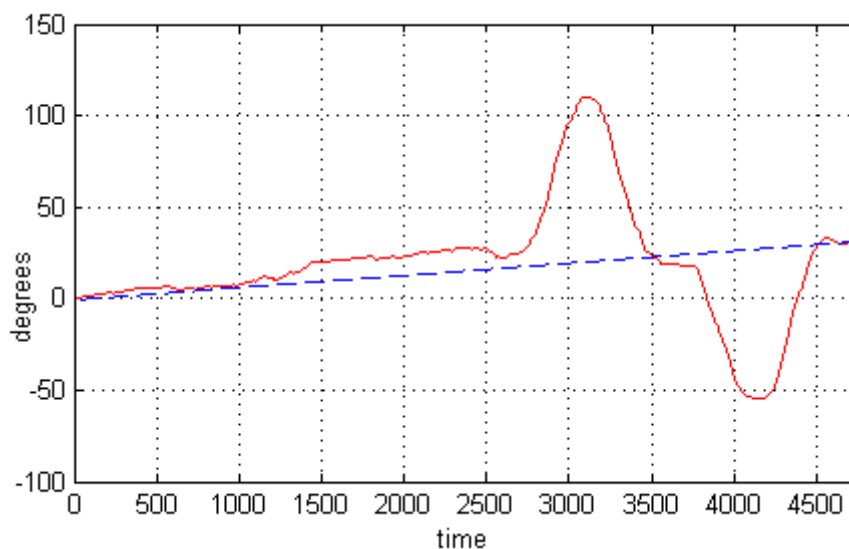
Descripción del calculo con los Giroscopos

El calculo con los giroscopos es sencillo, los giroscopos dan una medida de velocidad angular por lo cual hay que integrar este valor para obtener la posición angular.

$$\text{ángulo} = \int \text{velocidad angular (giroscopo)} \cdot dt + K$$

Esta fórmula es muy fácil de entender, si leemos la salida del acelerómetro una vez cada segundo y la medida nos da una velocidad = 5 grados/segundo. en caso de que empecemos con un ángulo = 0 (K=0) después del primer segundo tendremos que el ángulo será 5°, si la medida sigue siendo uno en el segundo segundo tendremos que el ángulo será 10°, el tercer segundo 15°... y de esta forma vamos calculando el ángulo en función de la velocidad angular.

El problema que tenemos con esta medida es que el acelerómetro siempre tiene un pequeño error de medida, por pequeño que sea el error al cabo de un tiempo integrando esta señal la medida de ángulo se nos habrá ido mucho. Por ejemplo en el siguiente gráfico se aprecia como después de 4500 muestras (12 segundos la medida) tiene un error de casi 40°!!!



Controlador de misión inteligente a bordo SURVIVAL.

El programa SURVIVAL es un programa que corre a bordo del UAV y que no requiere contacto con la estación de tierra para actuar, el sistema es un controlador de misión que pretende dar una solución única y completa para diferentes casos como generar misiones optimas (calcular velocidades, alturas, consumos...) , predecir del fallo y solucionar situaciones de emergencia sin asistencia humana.

No es un sistema que supervise y actúe solo en caso de emergencia sino que es un sistema que toma el control de la misión desde el principio y calcula la solución optima tanto si la misión se va a completar con éxito como si no.

El objetivo es dotar el sistema de cierta inteligencia tanto para reducir el trabajo de planificación de la misión como para solucionar emergencias de la mejor forma posible sin asistencia desde tierra.

¿Como es posible esto?

El sistema esta basado en la simulación matemática calculada a partir de un modelo físico del vuelo del vehiculo. El sistema evalúa ciertos aspectos como la probabilidad de éxito de la misión, coste económico, integridad de la aeronave. Para ello simula la misión completa desde el estado actual de la misión hasta el final mediante el modelo de vuelo en el cual se introducen las variables actuales del avión (actitud, velocidades, combustible, rpm motor...). El modelo de vuelo se actualiza constantemente mediante una herramienta de observación. Esta simulación se realiza con toda la velocidad de cálculo disponible y se ejecuta con la máxima frecuencia que permita el hardware (varias veces por minuto en cualquier caso).

Para entender de una forma práctica lo como actúa el sistema se exponen tres ejemplos:

- Gran tasa de descenso con picado excesivo causado por una posible orden errónea desde la estación de tierra: en función de su modelo de vuelo y simulando la misión con el modelo de vuelo el sistema predice una probabilidad de éxito nula y por lo tanto decide actuar, primero informa a la estación de tierra a la vez calcula la probabilidad de éxito eliminando parte de la misión, de esa manera rápidamente llega a la solución optima en la que elimina la orden que genera el fallo y completa la misión.
- Falta de combustible para completar la misión: un fallo en un motor a mitad de una misión genera un consumo excesivo y por lo tanto no es posible acabar la misión, el sistema comienza a calcular una probabilidad de éxito baja y por lo tanto debe de actuar, el sistema ensaya miles de posibilidades
- Fallo total de los motores a pocos segundos del despegue: el sistema calcula probabilidad de éxito nula, en unas pocas simulaciones se converge a la mejor solución: eliminas todas las fases de la misión y pasar al aterrizaje: en este caso el sistema resulta especialmente útil porque no existe tiempo para diseñar un circuito de entrada en la pista. El sistema simulará los giros y el aterrizaje y comprobará si es posible aterrizar en la misma pista o es necesario buscar un punto de aterrizaje alternativo.

Diseño y construcción de vehículos aéreos para las aplicaciones específicas de los clientes.

Características propias para el UAV

El diseño de un avión no tripulado esta condicionado a su aplicación específica, en la practica estas aplicaciones son muy diferentes a las aplicaciones actuales de la aviación general por lo que el diseño de los aviones es , por lo general, bastante diferente a los aviones tradicionales.



Los UAV tienen una serie de características que los diferencian mucho de la aviación general, el hecho que motiva estos cambios con respecto a un avión tripulado es que no necesita piloto, en principio esto no parece que pueda significar cambios en diseño del avión, sin embargo si pensamos un poco mas, al no llevar tripulación humana, no estamos condicionados a un tamaño mínimo lo cual puede ser una enorme ventaja a nivel de consumo si la aplicación solo requiere llevar una cámara a bordo.

El UAV puede necesitar permanecer largos periodos de tiempo en el aire haciendo círculos en torno a una posición, para ello con el fin de que el consumo baje con respecto a un avión tripulado hay que diseñar un avión que vuele a una velocidad muy baja, el consumo se reduce en tal medida que el avión puede volar durante días sin necesidad de repostar, lógicamente para conseguir este objetivo se requiere un preciso diseño a nivel aerodinámico y a nivel planta motriz (motores).