

21. Sistema de Navegación y Control para La Sonda Colibrí

R. Chachagua, N. López, A. Martell y P. Portillo, Departamento de Electrónica e Informática-UCA

Resumen

Se presenta una descripción general del diseño del Sistema de Navegación y Control a construir para la Sonda Colibrí; el cual debe funcionar como un sistema de navegación a estima en donde no se tiene un conjunto sofisticado de instrumentos para conocer el estado del vehículo en cualquier momento, y además deberá de simular las decisiones que un piloto podría tomar para guiar la Sonda Colibrí mediante un subsistema de cálculo de trayectoria y un subsistema de maniobra de superficies de control de vuelo.

Palabras Claves

Control, Controlador PID, Filtro Kalman, Navegación, Sonda Colibrí, Waypoint

I. INTRODUCCIÓN

La implementación de la Sonda Colibrí es un proyecto interdisciplinario que consiste en la construcción de un vehículo experimental que será lanzado a la quimiosfera terrestre, ubicada a una altitud de 30 KM sobre el nivel del mar. El objetivo de este vehículo será la recopilación de variables meteorológicas a diferentes altitudes sobre el terreno salvadoreño.

Dado que se desea recuperar la sonda luego de su lanzamiento para la extracción de toda la información recopilada, se ha solicitado el diseño e implementación de un Sistema de Navegación y Control (SNC) el cuál será el encargado de guiar a la sonda mediante una trayectoria segura hasta su lugar de lanzamiento, a través de superficies de control de vuelo la cual convierten al vehículo en un planeador. El presente artículo pretende presentar el diseño de dicho Sistema de Navegación y Control.

II. DINÁMICA DE ASCENSO Y DESCENSO

La sonda Colibrí será elevada hasta la quimiosfera terrestre mediante un globo con helio, y contará con dos paracaídas abordo para poder reducir su velocidad de descenso.

Cuando se suelte la sonda desde Tierra, se espera que se eleve hasta aproximadamente 30 KM sobre el nivel del mar, y se estima que no sobrepase los 100 KM de desplazamiento horizontal desde su punto de lanzamiento. En toda esta fase de ascenso, el Sistema de Navegación y Control tomará un rol pasivo, en el cual solamente estará tomando datos de posición y velocidad pero no estará a cargo de maniobrar el vehículo de la sonda Colibrí.

Si la sonda alcanza esta altura, deberá automáticamente soltarse del globo (si este aún no ha explotado), con lo cual comenzará una caída libre. Brevemente después del desprendimiento del globo, la sonda desplegará su primer paracaídas para reducir la velocidad de descenso.

Sin embargo, la densidad del aire a esta altura es insuficiente como para planear y darle sustentación a las alas del vehículo, por lo que seguirá su caída hasta aproximadamente 18 KM de altura sobre el nivel del mar. En este punto se desprenderá de su primer paracaídas.

Al realizar esta acción, el Sistema de Navegación y Control tomará un rol activo, en el cual es su deber maniobrar al vehículo de la sonda.

Sistema de Navegación y Control para La Sonda Colibrí



Su primera tarea será estabilizar la orientación del vehículo, para poder iniciar su planeo de descenso.

Una vez el vehículo esté planeando de forma estable, comenzará a planificar su descenso, y una vez el plan de navegación esté definido comenzará a planear en dirección del punto de lanzamiento.

Cuando la sonda haya finalmente alcanzado el final de la trayectoria de descenso, el cual será colocado a una altura de 1.5 KM sobre el punto de lanzamiento, el Sistema de Navegación y Control elevará la nariz del vehículo para hacerlo frenar y desplegará su segundo paracaídas para terminar su descenso.

III. SISTEMA DE NAVEGACIÓN Y CONTROL

De acuerdo a las necesidades del Sistema de Navegación y control, se requieren de varios componentes que garanticen el cumplimiento de su objetivo principal: Guiar el vehículo de la sonda Colibrí de vuelta a su lugar de lanzamiento.

Principalmente se necesita de un subsistema que calcule la ubicación y estado actual del vehículo, en donde esto comprende adicionalmente su velocidad y orientación.

Se debe proveer al vehículo una forma de almacenar una base de datos de obstáculos en Tierra, de tal forma que el Sistema de Navegación y Control, al no contar con instrumentación más sofisticada como un sonar o un radar, pueda recurrir a esta base de datos para detectar si hay un obstáculo potencialmente peligroso en su ruta de descenso.

Adicionalmente se requiere de un módulo que calcule la mejor trayectoria posible para guiar al vehículo de vuelta a Tierra.

También es necesario que el Sistema de Navegación y Control valide que la trayectoria generada no impacte con ningún obstáculo potencialmente

peligroso en Tierra, por lo que se debe integrar el módulo de cálculos de trayectoria a seguir con la base de datos de obstáculos terrestres.

Todas las tareas descritas anteriormente corresponden a tareas iniciales que el sistema debe ejecutar al tener control sobre la sonda, sin embargo hay dos tareas importantes que deberán darse durante el transcurso del descenso del vehículo.

Principalmente, el Sistema de Navegación y Control deberá guiar al vehículo de la sonda Colibrí sobre la ruta generada al arranque del sistema. Para esto se hará uso de varios Controladores PID (Proporcional, Integral, Derivativo) para deflactar las superficies de control de vuelo del vehículo y así dirigirlo sobre la trayectoria generada hasta que se alcance el objetivo final.

Y finalmente, el Sistema de Navegación y Control deberá estar revisando constantemente que las maniobras realizadas por el algoritmo de control estén efectivamente guiando al vehículo sobre la trayectoria designada. Esto con el fin de prevenir que el vehículo se aleje demasiado de su posición estimada según la trayectoria, y corregir los parámetros de navegación en caso que un evento externo haya desviado el vehículo de su posición estimada según la trayectoria, de acuerdo a un margen de tolerancia.

IV. NAVEGACIÓN

El Sistema de Navegación y Control intenta solventar la necesidad de guiar a la sonda en su descenso desde la quimiósfera hasta su lugar de lanzamiento garantizando la seguridad de la sonda al poder evadir obstáculos terrestres como montañas, o zonas restringidas como sobrevolar el Aeropuerto Internacional de El Salvador, y que el vehículo además logre una precisión de por lo menos 1 KM de error en su posición final para ser recuperado. Para todo lo anterior se han definido los siguientes puntos que definen la arquitectura en cómo se ha diseñado el subsistema de navegación que cumplirá con todas las necesidades señaladas.

A. Navegación a estima

La navegación a estima es aquella en que, utilizando únicamente herramientas básicas como reloj, brújula, GPS, etc. el piloto estima la ubicación de la aeronave. En el caso del vehículo de la sonda Colibrí, se contará con un algoritmo que integrará la información de dos sistemas comunes para el cálculo de posición para determinar con relativa exactitud dónde se encuentra.

Estos dos sistemas son, un sistema de posicionamiento global o GPS, y un sistema inercial que estará compuesto por acelerómetros y giroscopios.

Dado que ambos sistemas presentan tipos de errores opuestos, en donde el GPS posee una alta varianza al presentar su información pero no sufre un sesgo de error a lo largo del tiempo; y el sistema inercial que presenta una varianza relativamente nula con respecto al GPS pero sí presenta sesgo a lo largo del tiempo; se puede utilizar un Filtro Kalman para poder integrar la información de ambos sistemas y obtener un dato más preciso de la ubicación del vehículo al anular los errores que presenta cada sistema con las fortalezas del otro.

Un Filtro Kalman se basa en un modelo matemático que representa la forma en cómo un sistema intenta cambiar su estado. Para poder calcular el estado actual del sistema con mejor precisión, se basa en una medición (sujeta a error) del estado actual del sistema, un cálculo del estado previo del sistema y qué acciones ha realizado este para poder cambiar desde el estado anterior hasta el estado actual durante determinado tiempo. Dado que el Filtro Kalman se basa en el estado previo del sistema, se dice que este es un algoritmo recursivo.

De acuerdo a la información del estado previo del sistema, y aplicando el modelo matemático a las acciones que el sistema ha realizado para cambiar su estado anterior, se puede encontrar un estado en el cual se predice que el sistema se encuentra actualmente. Al comprar este

estado predicho, y el estado actual que se ha medido, se encuentra su diferencia entre ambos valores la cual será filtrada por el algoritmo para poder encontrar un valor más preciso del estado actual del sistema. De esta forma, y con este nuevo resultado, se aplica de nuevo el algoritmo después que ha pasado determinado tiempo para conocer el nuevo estado del sistema, y así sucesivamente.

Para el caso del Sistema de Navegación y Control, se ha establecido que el valor observado del sistema será la información proporcionada por el GPS, mientras que las acciones que el sistema ha realizado para cambiar su estado anterior estarán definidas por las aceleraciones que ha experimentado el vehículo al cambiar su posición.

De esta manera, el modelo matemático que define al Filtro Kalman será un modelo de cinemática que calcula la posición actual del vehículo en base a su posición anterior, su velocidad anterior, la aceleración experimentada y el tiempo que ha transcurrido desde la iteración anterior, tal como se describe en (1).

$$X = X_0 + V \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2 \quad (1)$$

Por lo cual se podrán contrastar los dos valores de posición (GPS y cálculo de nueva posición a partir de acelerómetros) para encontrar una posición más precisa, que tal como se describe anteriormente, esté libre de sesgo y varianza.

B. Navegación por waypoints

La estrategia a seguir para poder guiar el vehículo de la sonda Colibrí, será generar una serie de "waypoints", o puntos de control, sobre los cuales el vehículo deberá ir pasando en orden para poder alcanzar su objetivo. De esta forma, sin importar los requerimientos del algoritmo de control o el algoritmo de navegación, el algoritmo de control solo debe



encargarse de seguir estos waypoints mientras que navegación decide estratégicamente dónde colocarlos.

De esta forma se aísla la lógica de evasión de obstáculos y otros factores que se mencionarán más adelante, de la lógica que debe seguir el algoritmo de control.

C. Base de datos de obstáculos terrestres

Dado que el diseño del Sistema de Navegación y Control ha establecido que no ha de ser necesario contar con instrumentación sofisticada para el descenso de la sonda Colibrí, se debe contar con un método de evasión de obstáculos potencialmente peligrosos en la superficie de El Salvador, tales como montañas, volcanes y áreas restringidas como aeropuertos y ciudades.

Este problema se solventará mapeando una sección de terreno considerado como potencialmente peligroso para la trayectoria de descenso de la sonda Colibrí. Puesto que no se conoce desde dónde la Sonda comenzará su descenso, se debe mapear un área considerablemente grande alrededor del punto de destino para garantizar que el vehículo pueda evadir cualquier tipo de obstáculo.

El mapeo de esta área geográfica requerirá el almacenamiento de puntos que definan la latitud, longitud y altitud del obstáculo en cuestión, y adicionalmente se debe definir un radio de validez, el cual indicará en qué área el obstáculo está alrededor del punto definido anteriormente.

D. Generación y validación de trayectoria de descenso

La forma en cómo se deben colocar los waypoints que definen la trayectoria de descenso de la sonda Colibrí debe responder a las siguientes necesidades.

1) Alinearse con su destino: Es muy probable que la dirección de navegación del vehículo, luego de estabilizarse y comenzar a planear,

no esté alineada con el destino final. Por esta razón, se deberán colocar waypoints que hagan girar a la sonda (una media vuelta, por ejemplo) hasta alcanzar una dirección más cercana a la necesaria para llegar al destino.

- 2) Evasión de obstáculos: Para garantizar que la trayectoria generada no se intersecte con ningún obstáculo potencialmente peligroso, se implementarán dos maniobras de evasión de obstáculos. En primer lugar, se generará una trayectoria que sobrevuele el obstáculo, manteniendo una inclinación más horizontal para descender lo menos posible antes de pasar sobre el obstáculo, y luego hacer un descenso pronunciado una vez el obstáculo se haya pasado de largo. En segunda instancia, si esta trayectoria resultara no ser factible porque el tramo antes del obstáculo es demasiado horizontal o porque la caída después del obstáculo es demasiado abrupta, se deberá proceder a trazar una trayectoria que rodee el obstáculo. Si esta trayectoria no logra esquivar el obstáculo, se procederá a ampliar el rodeo aún más hasta que se estime que la trayectoria no impacta con el obstáculo.
- 3) Trayectoria demasiado corta: Existe la posibilidad que la sonda no se desplace mucho horizontalmente en su ascenso, por lo que quede muy cerca del punto de destino horizontalmente pero muy arriba de él. Por esta razón, la ruta generada implicará una caída en picada que podría dañar al vehículo y hacer que se pierda el control de éste. Para solventar esta situación, se ha diseñado que se coloque un waypoint a una distancia considerable lejos del punto de destino y del punto de posición actual, y justo a la mitad de la altitud requerida para el descenso, de tal forma que se pierda altitud al alcanzar este punto y la trayectoria se alargue por consiguiente.

Cada tramo de la trayectoria, definido por cada waypoint como destino, define los parámetros de navegación que debe mantener el vehículo para llegar desde la posición actual o último waypoint cruzado hasta el siguiente waypoint.

Estos parámetros de navegación son: la dirección de navegación con referencia al norte geográfico que deberá seguir la aeronave, y

la inclinación que el vehículo debe mantener para alcanzar la altitud requerida por el siguiente waypoint.

E. Validación del seguimiento de la trayectoria

La validación del seguimiento de la trayectoria es una tarea que el Sistema de Navegación y Control deberá estar realizando de forma constante cuando el vehículo se encuentre navegando a través de la trayectoria generada.

No necesariamente el mantener los parámetros de navegación definidos al calcular una trayectoria (dirección de navegación e inclinación) garantizan que se alcanzará el destino, puesto que hay variables externas, principalmente el viento, que pueden alterar la posición de la sonda sin que el módulo de control detecte un desvío en la trayectoria.

Esta subrutina de validación deberá calcular la distancia que existe entre la posición actual y la posición que debería tener el vehículo dentro de la trayectoria (distancia más corta de un punto a una recta), y de acuerdo a un valor de tolerancia, decidir si aún se encuentra dentro de la trayectoria o no.

La acción a tomar en el momento que se detecte que se ha salido de la trayectoria deberá ser recalcularse los parámetros de navegación hacia el siguiente waypoint planificado dentro de la trayectoria. Esto debe hacer que el módulo de control ahora se dirija a su destino tomando en cuenta que la posición es distinta a la esperada.

V. CONTROL

El módulo de control del Sistema de Navegación y Control será el encargado de tomar como entrada la trayectoria generada por el módulo de navegación, y guiar al vehículo sobre dicha trayectoria.

El método seleccionado para mantener el control del vehículo es mediante la implementación de un controlador PID (Proporcional,

Integral, Derivativo), el cual es un método que indica con qué intensidad hay que aplicar un cambio a un sistema para alcanzar un valor deseado.

El controlador PID posee dos entradas principalmente. Por un lado, espera como primer entrada un valor objetivo; mientras que la segunda entrada es el valor de la medición actual del sistema.

Por ejemplo, para el caso del Sistema de Navegación y Control se requiere alinear el vehículo de la sonda Colibrí con una dirección de navegación que decide el módulo de generación de trayectorias. Esta dirección objetivo se compara mediante el controlador PID con la dirección que actualmente tiene el vehículo, y el cálculo del controlador PID proporcionará como salida cuánto hay que corregir la dirección actual para acercarse este valor al objetivo que se desea.

Es un proceso iterativo, por lo que poco a poco irá indicando cambios cada vez más pequeños hasta que finalmente la salida del controlador PID sea cero, en cuyo caso significa que el valor objetivo ha sido alcanzado.

La dinámica del controlador PID para el Sistema de Navegación y Control se basa en mantener dos parámetros del vehículo.

A. Dirección de Navegación

Para mantener la dirección de navegación, tal como se describió anteriormente, entrará al controlador PID el valor de la dirección objetivo, y el valor de la dirección actual de navegación. En este caso, la salida del controlador PID será la velocidad de giro que debe llevar la aeronave para poder, eventualmente, alcanzar el valor objetivo de dirección.

Sin embargo, la velocidad de giro no es útil para manipular los servo actuadores que deflactan las superficies de vuelo del vehículo de la sonda Colibrí. Dado que para que una aeronave pueda realizar una maniobra de giro y cambie su dirección de navegación, es necesario realizar una acción de "banqueo".



El banqueo consiste en girar la aeronave en su eje transversal, de tal manera que un ala suba y la otra ala baje. De esta forma, se cambiará la dirección de la fuerza de sustentación lo que hará que la aeronave gire.

Para poder traducir la velocidad de giro que da como salida el PID con la magnitud del banqueo que se desea, se comparará esta velocidad de giro con la velocidad de giro que actualmente posee la aeronave para definir si se debe "banquear" más la aeronave o reducir la maniobra para dejar de girar porque ya se ha alcanzado el valor objetivo.

B. Ángulo de inclinación

El segundo parámetro a mantener en la aeronave es el ángulo de inclinación con el cual se está descendiendo hacia el destino. Al igual que la dirección, requiere de un controlador PID que reciba como entradas el ángulo de inclinación actual del vehículo, y también debe recibir a qué ángulo se desea inclinar el vehículo.

El controlador PID es flexible a eventos externos. Esto es una ventaja ya que si una acción externa cambia, por ejemplo la dirección del vehículo, el controlador PID notará el cambio entre el valor objetivo y el valor medido y aplicará las correcciones correspondientes sobre los servo actuadores hasta alcanzar de nuevo el valor objetivo.

Adicionalmente se requiere que el módulo de control detecte si se ha salido de la trayectoria o no, aunque el principal responsable de esta tarea es el módulo de navegación.

La forma en que el módulo de control pueda estimar si se sigue aún con la trayectoria o no, es midiendo cuánto tiempo toma estabilizar el sistema hacia el valor objetivo y asignarle un peso proporcional al error que existe entre el valor objetivo y el valor medido.

Si este resultado excede cierta tolerancia, es muy probable que ya no se esté navegando sobre la trayectoria generada y se requiera recalcular los parámetros de navegación.

Por ejemplo, un error grande en muy poco tiempo puede significar que se ha salido de la trayectoria. De igual manera, un error pequeño que nunca se logró corregir, a lo largo del tiempo significará que se ha abandonado la trayectoria original.

VI. REFERENCIAS

- [1] R. Cáceres, J. Clímaco, M. Rivas, V. Sánchez, 2012. Monitoreo de variables físicas por medio de microcontroladores programables en la sonda espacial Colibrí I. Antiguo Cuscatlán, El Salvador, Univ. Centroamericana José Simeón Cañas. F. Ingeniería y Arquitectura.
- [2] Napoleón Cornejo. Proyecto Colibrí - El primer proyecto aeroespacial en El Salvador. [En línea] 18 de octubre de 2012 [consulta: 1 marzo de 2013] Disponible en: <http://prezi.com/eov7ndfcjvve/proyecto-colibri/>
- [3] MOVABLE TYPE SCRIPTS, Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points [En línea] [Consulta: 22 marzo de 2013] Disponible en: <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>
- [4] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, Aerodynamics Index [en línea] [consulta: 22 marzo de 2013] Disponible en: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/short.html>
- [5] KALMAN FILTER FOR UNDERGRADS 1 [en línea] [consulta: 23 de abril 2013] Disponible en: <http://greg.czerniak.info/guides/kalman1/>
- [6] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, Banking Turn [en línea] [consulta: 22 de abril 2013] Disponible en: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/turns.html>
- [7] THE BASIC OF FLIGHT, Basic Flight Maneuvers [en línea] [consulta: 15 mayo 2013] Disponible en: http://www.aviastar.org/theory/basics_of_flight/flight.html