

MODELADO Y OPERACIÓN AUTÓNOMA DE UNA AERONAVE HÍBRIDA

Genzelis, Lucas^A

^A*Instituto de Investigación en Señales, Sistemas e Inteligencia Computacional sinc(i)-UNL-CONICET*

Área: Ingeniería

Sub-Área: Otras ingenierías y tecnologías

Grupo: Y

Palabras clave: UAV híbrido, modelado, MPC

INTRODUCCIÓN

Un UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) es un vehículo aéreo capaz de volar sin un piloto a bordo. Hay dos tipos de vehículos básicos que suelen emplearse para implementar UAVs: aviones y multirrotores. Cada uno de ellos cuenta con prestaciones que lo hacen adecuado para ciertos usos. Los multirrotores son más maniobrables y pueden permanecer en vuelo estacionario, siendo más aptos, por ejemplo, para recolectar información sobre un punto específico o para maniobrar en lugares reducidos. Por otra parte, los aviones pueden recorrer grandes distancias empleando un mínimo de energía, gracias a la sustentación provista por sus alas. Puede ocurrir que en determinadas circunstancias ninguno de estos vehículos cumpla completamente con los requerimientos operacionales. En consecuencia, surge la necesidad de contar con una aeronave de funcionalidad híbrida, que aproveche las ventajas provistas por ambos tipos de vehículos. Existen muchos tipos de UAVs híbridos (UAV-H) (Saeed y col., 2015), y este campo está cobrando un importante auge. Uno de estos tipos son los llamados sistemas duales, que utilizan una combinación de rotores verticales y un rotor de empuje, permitiendo que el vehículo pueda realizar tanto vuelo horizontal como vertical sin necesidad de alterar su geometría. Este tipo de UAV-H no ha recibido gran atención en la literatura especializada.

El propósito de este trabajo consiste en: i) el desarrollo de un modelo matemático de un UAV-H tipo sistema dual con capacidad de modificar la extensión de sus alas y ii) el diseño de un sistema de control automático para este vehículo. De esta forma, se pretende obtener y controlar un UAV híbrido que combine la capacidad de maniobrabilidad de un multirrotor, la eficiencia energética de un avión y la posibilidad de desplegar y contraer sus alas para lograr una máxima eficiencia en vuelo.

Director del becario: Dr. Leonardo Giovanini
Colaboradora: Dra. Marina Murillo
Colaborador: Ing. Guido Sánchez

MODELADO

Como geometría del UAV-H tipo sistema dual a modelar se propone la que se observa en la Fig. 1. Con el objetivo de modelar el UAV-H propuesto, se supone que éste está constituido por dos subsistemas independientes: un avión y un multirroto. Por lo tanto, el modelo completo de este UAV-H puede obtenerse como la suma de las contribuciones dinámicas de ambos subsistemas. Para realizar el modelado se utilizan diferentes marcos de referencia y se emplean las ecuaciones de Newton-Euler, en función de la fuerza y el torque totales que actúan sobre el vehículo. Este procedimiento es similar al empleado en la mayor parte de los trabajos del área (Saeed y col., 2015).

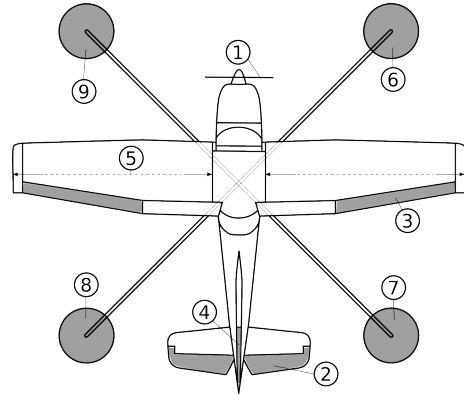


Figura 1: UAV-H propuesto

Marcos de referencia

En este trabajo se emplean los siguientes marcos de referencia:

- Un *marco inercial*, con una posición y orientación fijas.
- Un *marco del vehículo*, cuya orientación coincide siempre con la de éste.
- Un *marco aerodinámico*, cuya orientación se describe mediante los ángulos de ataque α y de deslizamiento β .

Para representar la orientación del vehículo (es decir, su actitud) y posibilitar la transformación de vectores entre los diferentes marcos de referencia, se ha optado por el empleo de cuaterniones, ya que permiten realizar los cálculos de forma simple y evitan la singularidad conocida como "gimbal lock".

Variables de estado y controles

El estado completo del UAV-H en cada instante puede ser descrito mediante el vector $\mathbf{x}=(n^i, e^i, h^i, u, v, w, q_0, q_1, q_2, q_3, p, q, r)$, donde:

- n^i, e^i, h^i es la posición (norte, este y altura) del centro de masa del vehículo, expresada desde el marco de referencia inercial.
- u, v, w es la representación del vector velocidad del centro de masa del UAV-H, expresada en el marco de referencia del vehículo.
- q_0, q_1, q_2, q_3 son las componentes del cuaternión de actitud del vehículo.
- p, q, r es la velocidad angular del cuerpo, expresada en el marco del vehículo.

El UAV-H propuesto dispone de nueve actuadores, que pueden observarse en la Fig. 1, dando lugar al vector de entradas $\mathbf{u}=(th, \delta_e, \delta_a, \delta_r, l, \Omega_0, \Omega_1, \Omega_2, \Omega_3)$, donde th (1) es la fuerza generada por el rotor de empuje, $\delta_e, \delta_a, \delta_r$ (2,3,4) son la inclinación de elevador, alerón y timón de cola, l (5) es la longitud de envergadura alar, y $\Omega_0, \Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ (6-9) son las fuerzas generadas por cada uno de los rotores verticales.

Fuerzas y torques generados por cada subsistema

Para modelar el subsistema avión, se utilizó como base al Cessna 172. En Murillo (2014) las fuerzas y momentos aerodinámicos generados por las superficies de sustentación dependen de los controles $\delta_e, \delta_a, \delta_r$, la velocidad total v_t y los

ángulos de ataque y deslizamiento α y β , que pueden calcularse en función del estado del UAV-H. Realizando cambios de coordenadas, se obtienen la fuerza y momento aerodinámicos en el marco del vehículo, F_{aero}^v y M_{aero}^v , a lo que se suma la fuerza generada por el rotor de empuje, F_{emp}^v , que depende del control th .

Por otra parte, en la literatura pueden encontrarse numerosos modelos de multirrotores. Aquí se utiliza el presentado por Bresciani (2008), realizando algunas modificaciones sobre el mismo. De esta manera se obtiene la fuerza F_m^v y el torque M_m^v , que dependen de los controles Ω_0 , Ω_1 , Ω_2 y Ω_3 .

Combinación de los subsistemas avión y multirrotor

Para obtener la dinámica del UAV-H a partir los aportes de los subsistemas individuales, se define el coeficiente $\gamma = u/(1+|v|+|w|)$. Se utiliza luego una función de transición suave $f_{suav}(\gamma)$, que permite obtener un modelo diferenciable. La fuerza y el momento totales que actúan sobre el UAV-H son en consecuencia $F_{Tot}^v = F_m^v + f_{suav}(\gamma)F_{aero}^v + F_{emp}^v$ y $M_{Tot}^v = M_m^v + f_{suav}(\gamma)M_{aero}^v$. Conociendo F_{Tot}^v y M_{Tot}^v y empleando las ecuaciones de Newton-Euler, se obtiene una descripción completa en espacio de estados de la evolución del sistema, que puede expresarse como

$$\dot{x} = F(x, u) \quad (1)$$

CONTROL

Con el propósito de posibilitar el control automático del UAV-H propuesto, se utiliza un método de control predictivo (MPC) basado en el esquema presentado por Murillo y col. (2016). Según éste, en cada instante se resuelve el problema de optimización

$$\begin{aligned} & \min J(k) \\ \text{s. a. } & \begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + E_k \\ J(k) \leq J_0(k) \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

Su solución es la secuencia de controles que se aplicarían a lo largo del horizonte de predicción y $J_0(k)$ es la función de costo evaluada en una solución inicial formada por los controles óptimos calculados en la iteración anterior. La segunda desigualdad de la Ec. (2) impone una restricción contractiva que define una cota superior para $J(k)$ y garantiza la convergencia de la solución iterativa (para un análisis detallado acerca de esta restricción contractiva, remitirse a Murillo y col. (2016)).

RESULTADOS OBTENIDOS

A modo ilustrativo, se presenta aquí una maniobra de vuelo autónomo. En un comienzo el vehículo se halla en un punto estacionario, sustentándose a una altura 10 m empleando sólo los rotores verticales y manteniendo sus alas contraídas. Luego, en un momento dado, se pide que el UAV-H se eleve a una altura de 100 m y que después acelere hacia adelante hasta alcanzar una velocidad constante. Posteriormente, se exige que el vehículo se detenga en una posición determinada. En la Fig. 2 se muestran los resultados obtenidos.¹ En las Figs. 2(a) y 2(b) pueden verse en líneas punteadas las trayectorias pasadas al controlador como referencia, que coinciden de manera casi exacta con la trayectoria real. Como se observa, el vehículo

1. Los demás estados y controles poseen valores despreciables. Además, por claridad no se grafica el cuaternión de actitud, sino el ángulo de *pitch* calculado a partir de éste.

realiza la maniobra con éxito, utilizando los controles de manera adecuada para lograr este objetivo.

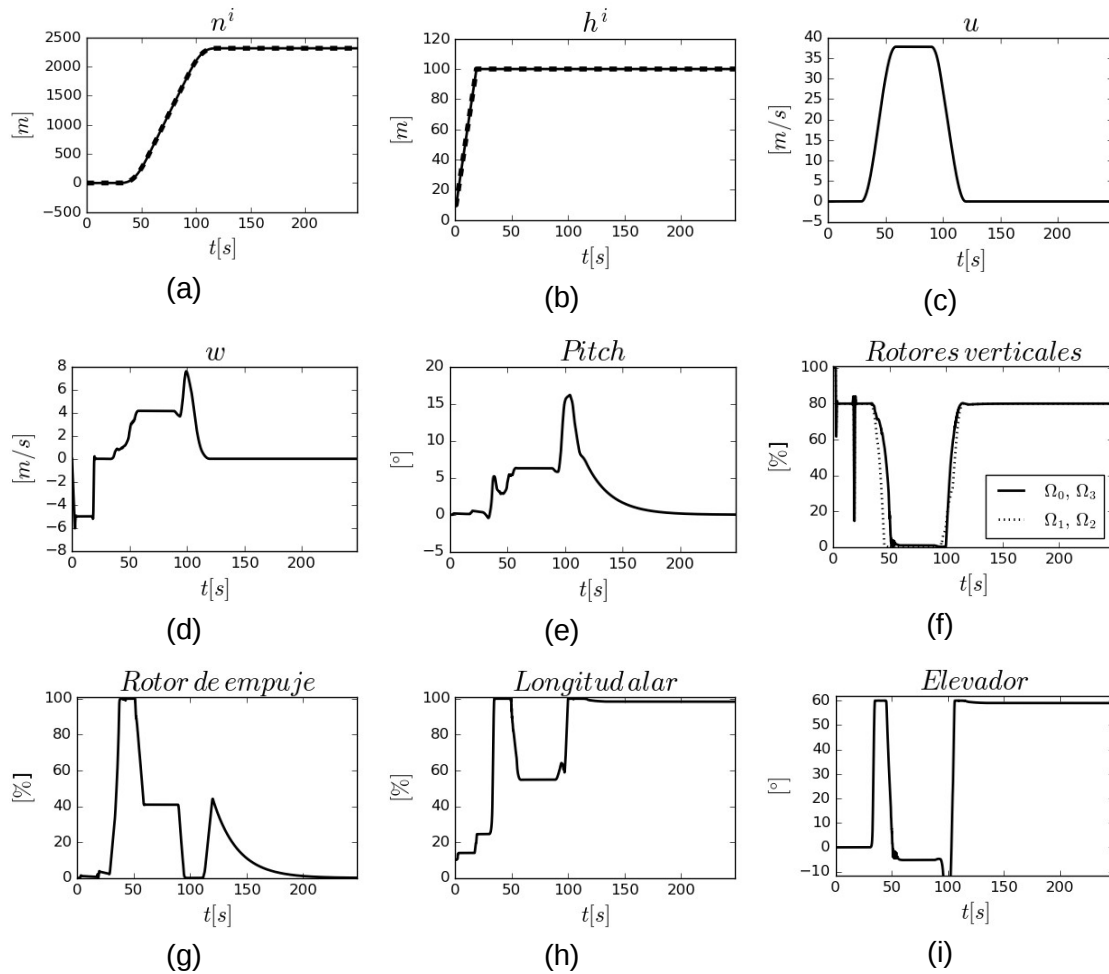


Figura 2: resultados de la simulación

CONCLUSIONES

En este trabajo se obtuvo un modelo para un UAV híbrido tipo sistema dual con capacidad de modificar la extensión de sus alas. Para ello, se emplearon modelos de avión y multirrotor disponibles en la literatura especializada, combinándolos de forma adecuada. Por otra parte, se desarrolló un controlador basado en MPC para lograr que el vehículo siga trayectorias de referencia. El controlador y el modelo del UAV-H propuesto fueron probados exitosamente mediante la simulación de una maniobra autónoma de vuelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bresciani T.**, 2008. Modelling, identification and control of a quadrotor helicopter.
- Murillo M.**, 2014. Diseño de sistemas de control y navegación para vehículos aéreos no tripulados mediante simulación virtual. Tesis doctoral, Universidad Nacional del Litoral.
- Murillo M., Sánchez G., Giovanini L.**, 2016. Iterated non-linear model predictive control based on tubes and contractive constraints. ISA Transactions, 62, 120–128.
- Saeed A., Younes A., Islam S., Dias J., Seneviratne L., Cai G.**, 2015. A review on the platform design, dynamic modeling and control of hybrid UAVS. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), IEEE, 806–815.