

Control de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS)

Carlos Mario Vélez S., Dr.

Ingeniería Matemática
Ingeniería Física
Maestría en Matemáticas Aplicadas



Resumen

Principales ideas de desarrollo de UAS autónomos desde la perspectiva del proyecto Colibrí, con énfasis en:

1. Enfoque basado en el modelo matemático
2. Aspectos de prototipado rápido de software con Matlab/Simulink
3. Experiencias reales

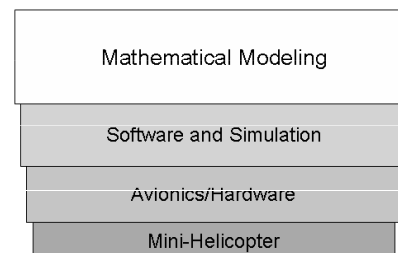
Se requiere de **ciencia** y tecnología para el vuelo autónomo de un mini-helicóptero robot, en áreas como:

- Matemática y física
- Simulación digital
- Heurística - Inteligencia artificial
 - Algoritmos genéticos
 - Redes neuronales
 - Lógica fuzzy
- Desarrollo de software
- **Control automático**
- Robótica y mecatrónica
- Telemática y comunicaciones
- Realidad virtual
- Visión artificial



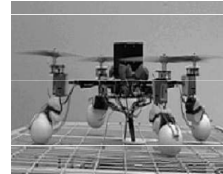
Proyectos complejos como el del mini-helicóptero, ¿qué tienen de interesante para la ciencia, la tecnología y la educación?

- Requerimientos de **trabajo interdisciplinario** y **visión sistémica** (vehículo como parte de un sistema)
- Interés en la comunidad científica por las implicaciones inherentes
- Integración sinérgica de componentes y conocimientos
- Uso, adaptación y desarrollo de las tecnologías y técnicas más avanzadas
- Aplicación de ciencia básica
- Implicaciones tecnológicas
- **Motor de nuevas ideas y métodos**
- Aplicaciones prácticas importantes



Definición de UAV

- UAV – "Unmanned Aerial Vehicles"
- UCAV – "Unmanned Combat Air Vehicle"
- Vehículo aéreo sin piloto
- El concepto está migrando hacia **UAS** ("unmanned aircraft system") para incluir la estación de tierra y otros elementos
- Un UAV puede ser:
 - **Completamente autónomo:** misión dentro del ámbito programado, sólo un monitoreo desde tierra
 - **Semi-autónomo:** El piloto realiza cambios y conduce la misión a través de una interfaz. Sin esta información el UAV realizará operaciones preprogramadas
 - **Operación remota (RPV)**

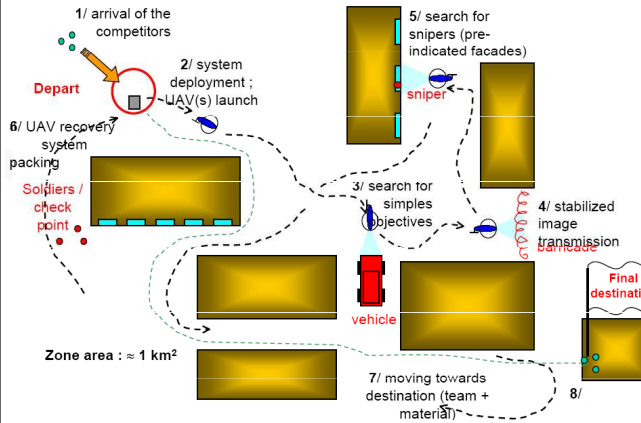


Aplicaciones

- Monitoreo y vigilancia: redes, fronteras, tráfico
- Monitoreo ambiental y meteorología
- Búsqueda y rescate
- Detección de incendios forestales, alertas tempranas
- Fotografía aérea y filmación
- Cartografía, modelado de superficies terrestres
- Aspersión de semillas y fumigación de cultivos
- Geofísica aplicada (exploración minera)
- Búsqueda de peces
- Transporte
- Radiodifusión, telecomunicaciones
- Recolección de información
- Promoción y publicidad



UAVs autónomos - "International Aerial Robotics Competition"

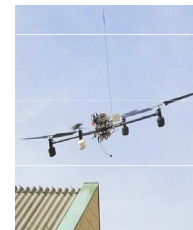


Tareas:

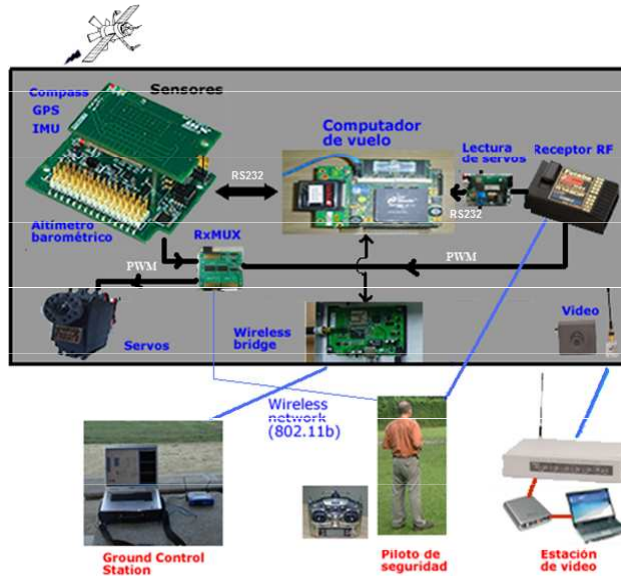
1. Navegación
2. Localización de un símbolo
3. Ingreso y captura de datos
4. Vuelo cooperativo

Clasificación de UAVs

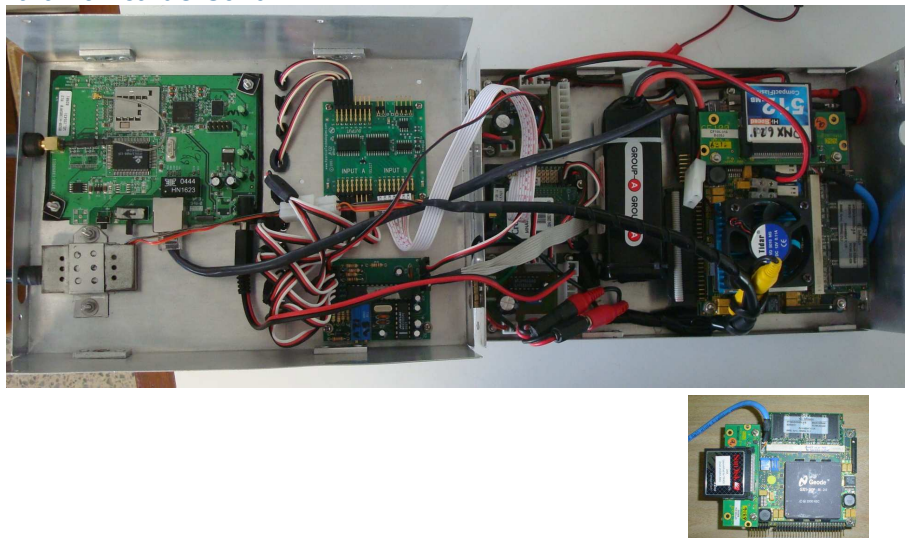
UAV Categories	Acronym	Range (km)	Flight Altitude (m)	Endurance (hours)	Take-Off Mass (kg)
Tactical					
Micro	μ (Micro)	< 10	250	1	< 5
Mini	Mni	< 10	150 ^b to 300 ^a	< 2	< 30 (150 ^b)
Close Range	CR	10 to 30	3,000	2 to 4	150
Short Range	SR	30 to 70	3,000	3 to 6	200
Medium Range	MR	70 to 200	5,000	6 to 10	1,250
Medium Range Endurance	MRE	> 500	8,000	10 to 18	1,250
Low Altitude Deep Penetration	LADP	> 250	50 to 9,000	0.5 to 1	350
Low Altitude Long Endurance	LALE	> 500	3,000	> 24	< 30
Medium Altitude Long Endurance	MALE	> 500	14,000	24 to 48	1,500
Strategic					
High Altitude Long Endurance	HALE	> 2000	20,000	24 to 48	(4,500 ^c)12,000
Special Purpose UAVs					
Unmanned Combat Aerial Vehicle	UCAV	approx. 1500	10,000	approx. 2	10,000
Lethal	LETH	300	4,000	3 to 4	250
Decoy	DEC	0 to 500	5,000	< 4	250
Stratospheric	STRATO	> 2000	>20,000 & <30,000	> 48	TBD
Exo-stratospheric	EXO	TBD	> 30,000	TBD	TBD
Space	SPACE	TBD	TBD	TBD	TBD
^a = Aerosonde & EagleScan		TBD = To Be Defined		^b = according to national legislation	
				^c = in Japan ^c = Predator B	



La aviónica de Colibrí



La aviónica de Colibrí



Primero: entender lo básico del problema

- Un helicóptero es:
 - Inherentemente inestable
 - Un sistema multivariable (más de 17 estados)
 - De dinámicas acopladas
- Volar un avión es a montar en una bicicleta, como volar un helicóptero lo es a montar un monociclo
- Necesidad de un modelo complejo para la simulación (modelo teórico), pero un modelo razonablemente sencillo para el diseño



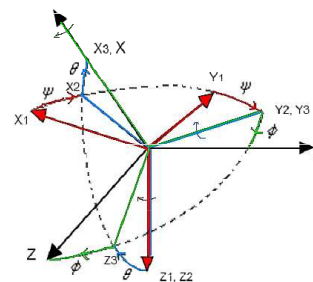
Segundo: obtención del modelo matemático

- Claro, con ayuda de libros, artículos y otras personas
- **Trabajo en equipo**

$$\begin{cases} \dot{u} = (vr - wq) - g \sin \theta + (X_{mr} + X_{fus}) / M_a \\ \dot{v} = (pw - ru) + g \cos \theta \sin \phi + (Y_{mr} + Y_{fus} + Y_{tr} + Y_{vf}) / M_a \\ \dot{w} = (qu - pv) + g \cos \theta \cos \phi + (Z_{mr} + Z_{fus} + Z_{ht}) / M_a \\ \dot{p} = qr(I_y - I_z) / I_x + (L_{mr} + L_{vf} + L_{tr}) / I_x \\ \dot{q} = pr(I_z - I_x) / I_y + (M_{mr} + M_{ht}) / I_y \\ \dot{r} = pq(I_x - I_y) / I_z + (-Q_e + N_{vf} + N_{tr}) / I_z \end{cases}$$

$$\dot{b}_1 + \frac{b_1}{\tau_e} = -p + \frac{1}{\tau_e} 2k_\mu \left(\frac{4\delta_{col}}{3} - \lambda_o \right) \frac{v - v_w}{\Omega_{mr} R_{mr}} + \frac{B_{\delta_{lat}}}{\tau_e} \delta_{lat}$$

$$\dot{a}_1 + \frac{a_1}{\tau_e} = -q + \frac{1}{\tau_e} \left[2k_\mu \left(\frac{4\delta_{col}}{3} - \lambda_o \right) \frac{u - u_w}{\Omega_{mr} R_{mr}} + k_\mu \frac{16\mu_{mr}^2}{8|\mu_{mr}| + a_{mr} \sigma_{mr}} \text{sign} \mu_{mr} \frac{w - w_w}{\Omega_{mr} R_{mr}} \right] + \frac{A_{\delta_{lon}}}{\tau_e} \delta_{lon}$$



Modelo linealizado

- No es necesario incluir las variables (ψ, x, y, z) debido a que las otras variables no dependen de ellas

$$\mathbf{x} = [u \ v \ w \ p \ q \ r \ \phi \ \theta \ a_1 \ b_1]^T$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{a}_1 \\ \dot{b}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cuerpo rígido} \\ \text{Acoplamiento rotor/cuerpo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \\ \phi \\ \theta \\ a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{br} \\ \delta_{br} \\ \delta_{col} \\ \delta_{ped} \end{bmatrix}$$

Modelo matemático

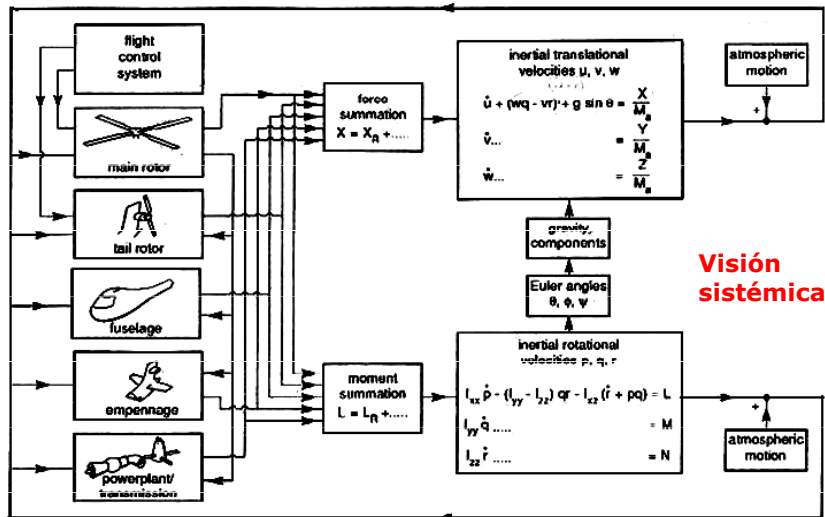
- Se aplica el método "tip-path-plane" (TPP) en lugar de la teoría "blade element" (BET)
- Algunos parámetros se hallan experimentalmente
- Cálculo iterativo del influjo λ_0 y el coeficiente de empuje C_T :

$$\lambda_0 = \frac{C_T}{2\eta_w \sqrt{\mu^2 + (\lambda_0 - \mu_z)^2}}$$

$$C_T = \begin{cases} C_T^{ideal}, & -C_T^{max} \leq C_T^{ideal} \leq C_T^{max} \\ -C_T^{max}, & C_T^{ideal} < -C_T^{max} \\ C_T^{max}, & C_T^{ideal} > C_T^{max} \end{cases} \quad C_T^{ideal} = \frac{a\sigma}{2} \left[\delta_{col} \left(\frac{1}{3} + \frac{\mu^2}{2} \right) + \frac{\mu_z - \lambda_0}{2} \right]$$

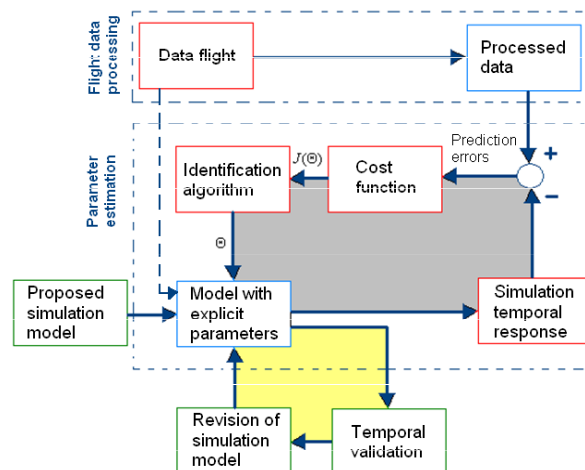
$$\Lambda = \mu^2 + (\lambda_0 - \mu_z)^2 \quad f_j = 0.6 \quad \lambda_{o,j+1} = \lambda_{o,j} - f_j \frac{(2\eta_w \lambda_{o,j} \Lambda^{1/2} - C_T) \Lambda}{2\eta_w \Lambda^{3/2} + \frac{a\sigma}{4} \Lambda - C_T (\mu_z - \lambda_{o,j})}$$


Tercero: integración de todos los subsistemas



Cuarto: validación del modelo

Modelado matemático experimental - Optimización

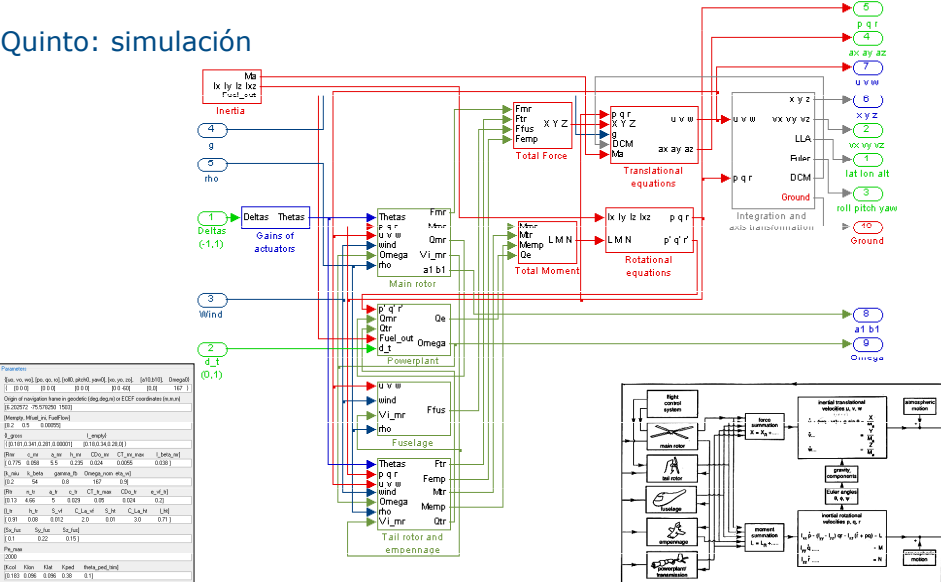





1. Introducción
 2. Estimación del estado
 3. Control de UAVs
 4. Conclusiones y preguntas

Un enfoque matemático
 UAVs
 Aviónica
Modelado matemático

Quinto: simulación



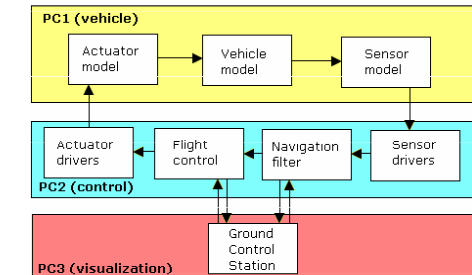
© Carlos Mario Vélez S. <http://ingenieria-matematica.eafit.edu.co> 17/37

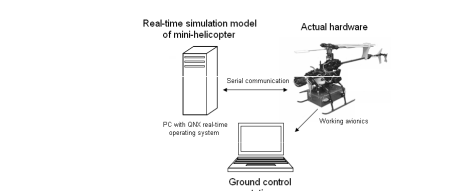


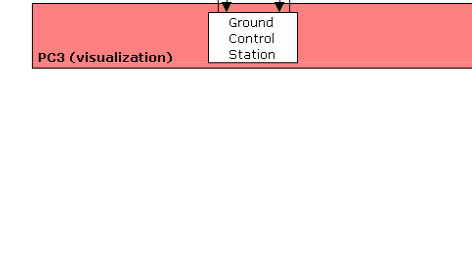
1. Introducción
 2. Estimación del estado
 3. Control de UAVs
 4. Conclusiones y preguntas

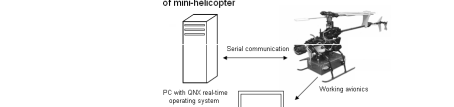
Un enfoque matemático
 UAVs
 Aviónica
Modelado matemático

Simulación más realista: Simulación "Software-in-the-loop" o "Hardware-in-the-loop"



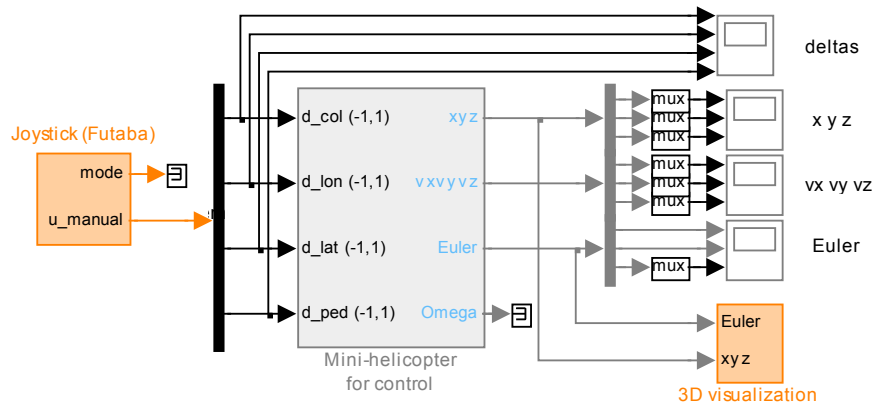




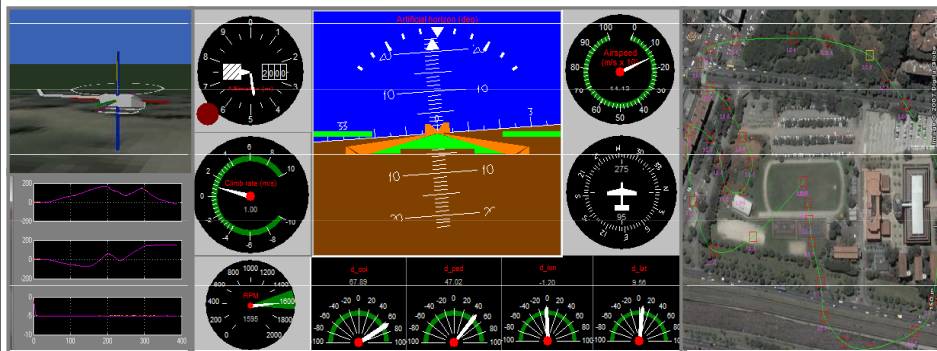


© Carlos Mario Vélez S. <http://ingenieria-matematica.eafit.edu.co> 18/37

Integración del hombre a la simulación: interacción con el piloto



Estación de tierra flexible – Simulación 3D

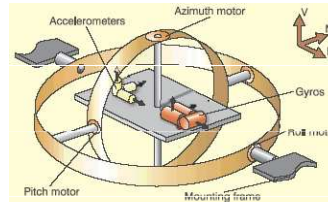


Ideas generales del INS (sistema de navegación inercial)

■ Determinación de la **posición, velocidad y actitud** de un vehículo con relación a un sistema de referencia inercial a partir de la aceleración y velocidad angular entregadas por la IMU

■ Los errores de las mediciones se minimizan agregando sensores redundantes (ayudas de navegación):

- GPS
- Altímetro barométrico
- Magnetómetro
- Sensores de velocidad
- Sensores ópticos de línea de vista
- Radar, sonar



■ Tipos de INS

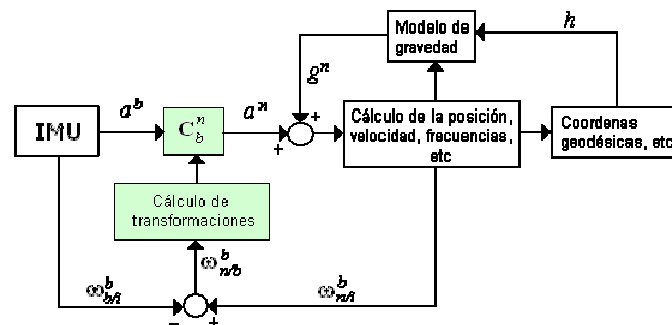
- INS de tipo cardán (Gimballed platform)
- INS de tipo analítico (strap-down)



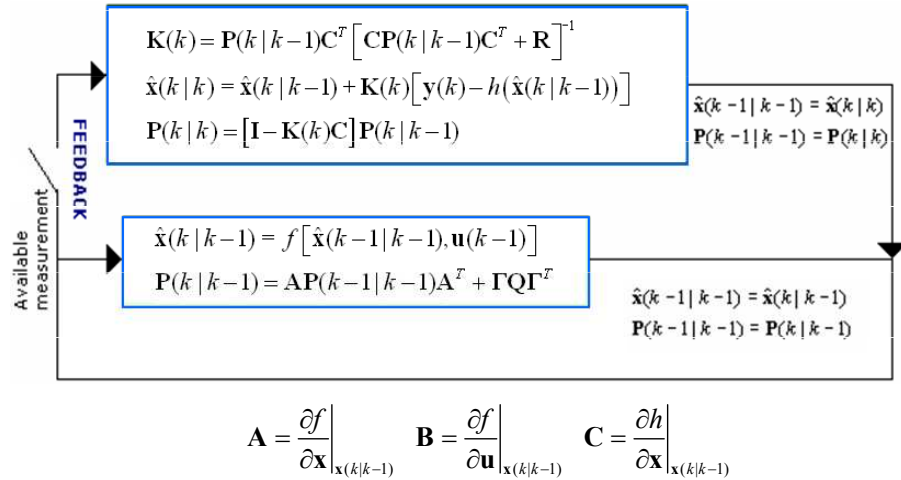
INS de tipo analítico ("strapdown")

■ Uso de las mediciones de la velocidad angular y la aceleración del vehículo (modelo cinemático) para obtener, resolviendo diez ecuaciones diferenciales no lineales, la posición, velocidad y actitud (PVA)

■ Ecuaciones para: (x, y, z) , (u, v, w) , (q_0, q_1, q_2, q_3)



Filtro extendido de Kalman (EKF)



Filtro extendido de Kalman (EKF) – Uso de ángulos de Euler o cuaterniones

$$\mathbf{v}^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{v}^b = (\mathbf{C}_n^b)^T \mathbf{v}^b$$

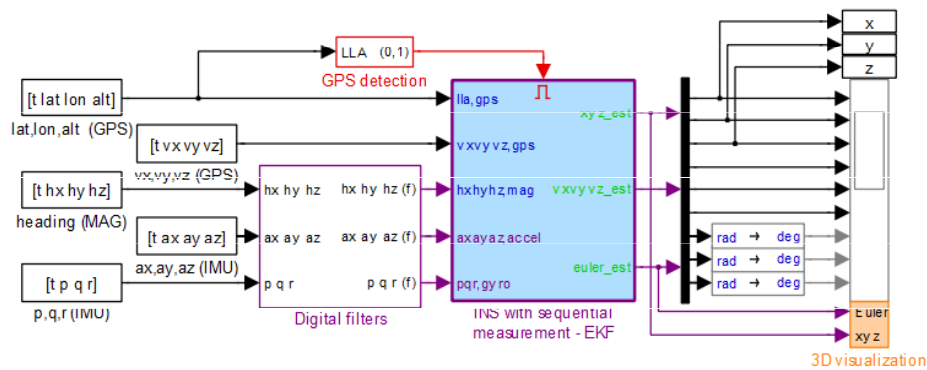
$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{v}}^b = \mathbf{F}^b / M_a - \mathbf{\Omega}_{b/n}^b \mathbf{v}^b + \mathbf{C}_n^b \mathbf{g}^n$$

$$\begin{cases} \dot{u} = X / M_a - (wq - vr) - g \sin \theta \\ \dot{v} = Y / M_a - (ru - pw) + g \cos \theta \sin \phi \\ \dot{w} = Z / M_a - (pv - qu) + g \cos \theta \cos \phi \end{cases}$$

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

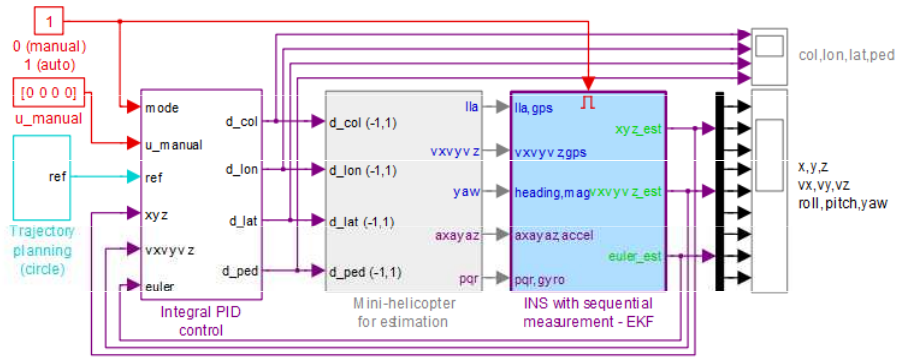
EKF con datos reales



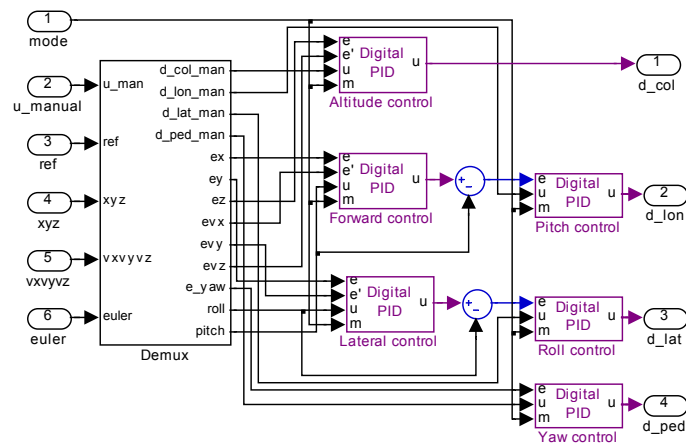
Retos

- Dinámica de vuelo cambiante en toda la envolvente de vuelo
- Comportamiento multivariable con acoplamiento entre ejes
- Inestabilidad y sensibilidad a las perturbaciones
- Dinámica de alto orden
- El diseño multivariable basado en el modelo supera ampliamente los sistemas clásicos de control SISO
- Tareas:
 - Compensación
 - Regulación y seguimiento de trayectorias
 - Maniobrabilidad
 - Guía
 - Planeación de la misión
- Controladores típicos: óptimo, robusto, PID, no lineal, adaptativo, inteligente (fuzzy, RNA)

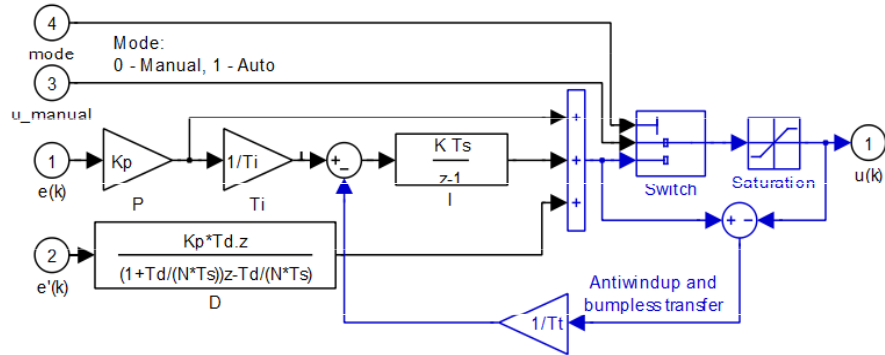
Control PID con estimación del estado



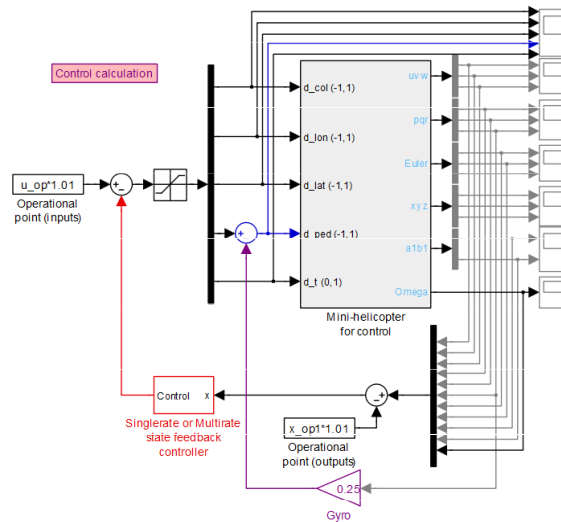
Control PID



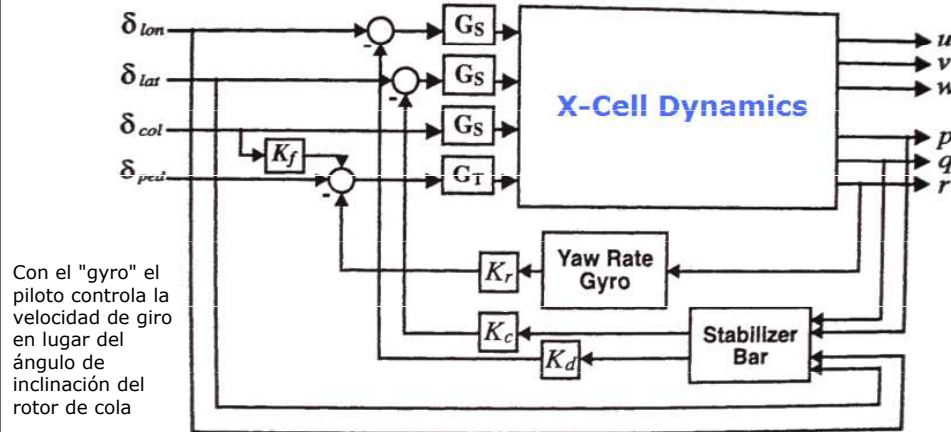
Control PID - "Antiwindup", "Bumpless transfer"



Control por realimentación del estado

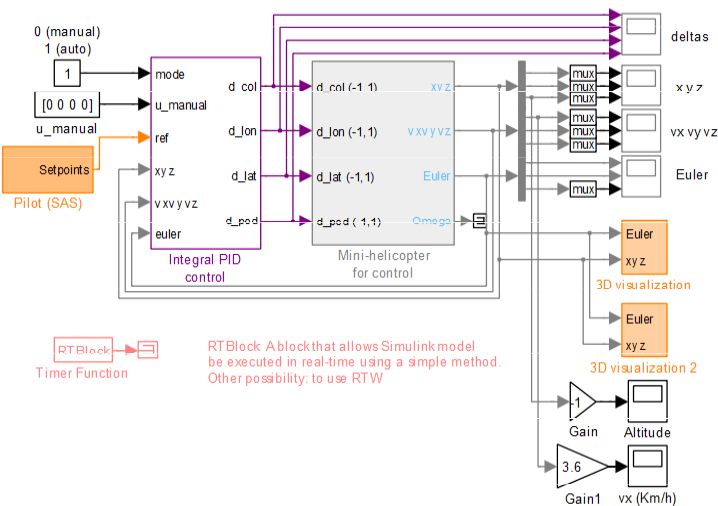


Sistema aumentado de estabilidad (SAS)



Con el "gyro" el piloto controla la velocidad de giro en lugar del ángulo de inclinación del rotor de cola

Sistema aumentado de estabilidad (SAS)



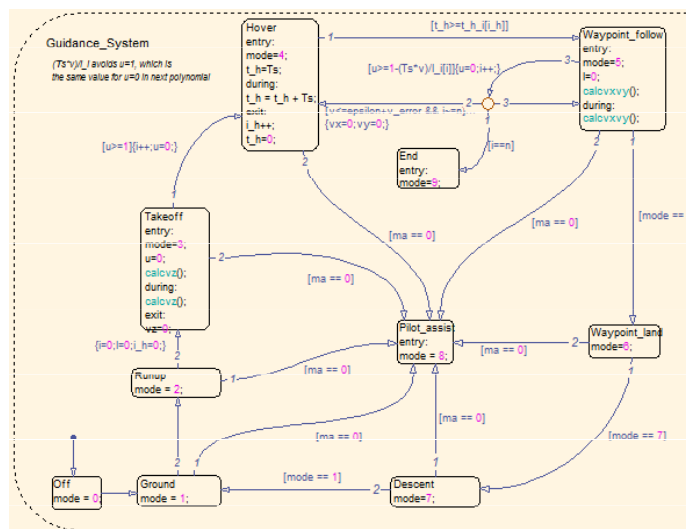
RTBlock
Timer Function


RTBlock A block that allows Simulink model be executed in real-time using a simple method. Other possibility: to use RTW

Generación de trayectorias suaves



Máquina de estado finito

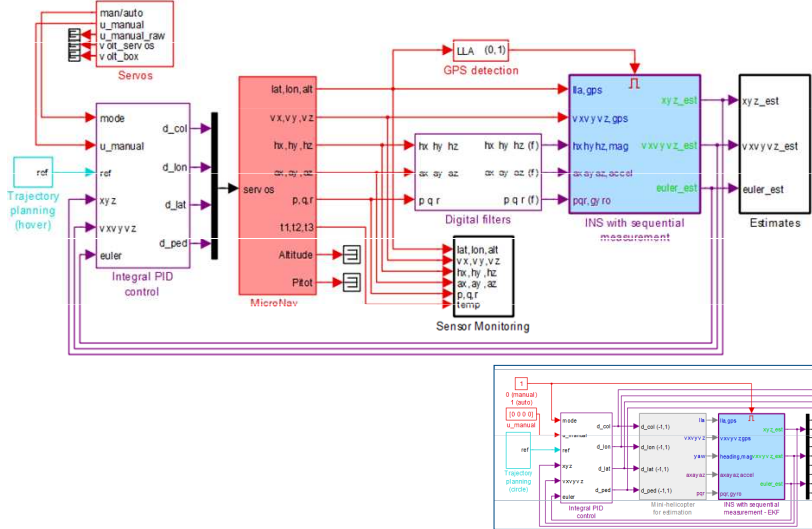




1. Introducción
2. Estimación del estado
3. Control de UAVs
4. Conclusiones y preguntas

Consideraciones generales
Control
Generación de trayectorias
Implementación


Control en tiempo real – Prototipado rápido de software




© Carlos Mario Vélez S.

<http://ingenieria-matematica.eafit.edu.co>

35/37




1. Introducción
2. Estimación del estado
3. Control de UAVs
4. Conclusiones y preguntas



28 a 30 de septiembre

- La ciencia básica es indispensable en la ingeniería moderna, sobretodo en aplicaciones avanzadas
- Herramientas modernas del ingeniero:
 - Modelado matemático
 - Simulación
 - Heurística
- Los proyectos complejos son un espacio propicio para la aplicación de la matemática
- Aprendizaje rápido utilizando herramientas visuales
- Ambiente de **prototipado rápido** basado en Matlab y Simulink, con posibilidad de generación de código
- Posibilidades de validación en simulación SIL y HIL
- Ventajas de los UAVs
 - Bajo costo, pocos riesgos, vuelo colectivo, montaje rápido, sigilo, agilidad, autonomía, accesibilidad
- Necesidad de diseño y desarrollo del producto basados en UAVs



© Carlos Mario Vélez S.

<http://ingenieria-matematica.eafit.edu.co>

36/37

- Identificación paramétrica y heurística
- Estación de tierra flexible y adaptable a diferentes pruebas
- Problemas principales:
 - Ajuste de la aviónica
 - Vibraciones
 - Costo de las pruebas
- Trabajo futuro
 - Optimización del control y el INS, prueba de otros métodos
 - Mejoramiento de la máquina de estados finitos
 - Mejoramiento de la plataforma HIL y SIL
 - Mejoramiento del modelo matemático y métodos de identificación
 - Visión artificial
 - Optimización de la aviónica y del aislamiento de vibraciones
 - Sistemas redundantes para tolerancia a fallos
 - Desarrollo de productos. Alianzas estratégicas