

Trabajo Fin de Máster

Estimación del ángulo de balanceo de una motocicleta mediante medidas inerciales

Autor:

Diego Maceira Muños

Tutores:

Emilio Sanjurjo Maroño

Alberto Luaces Fernández

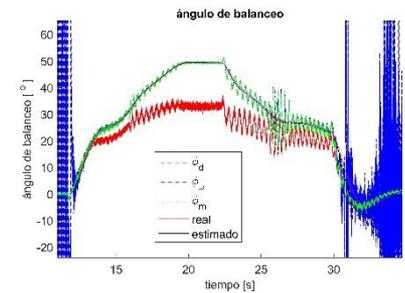
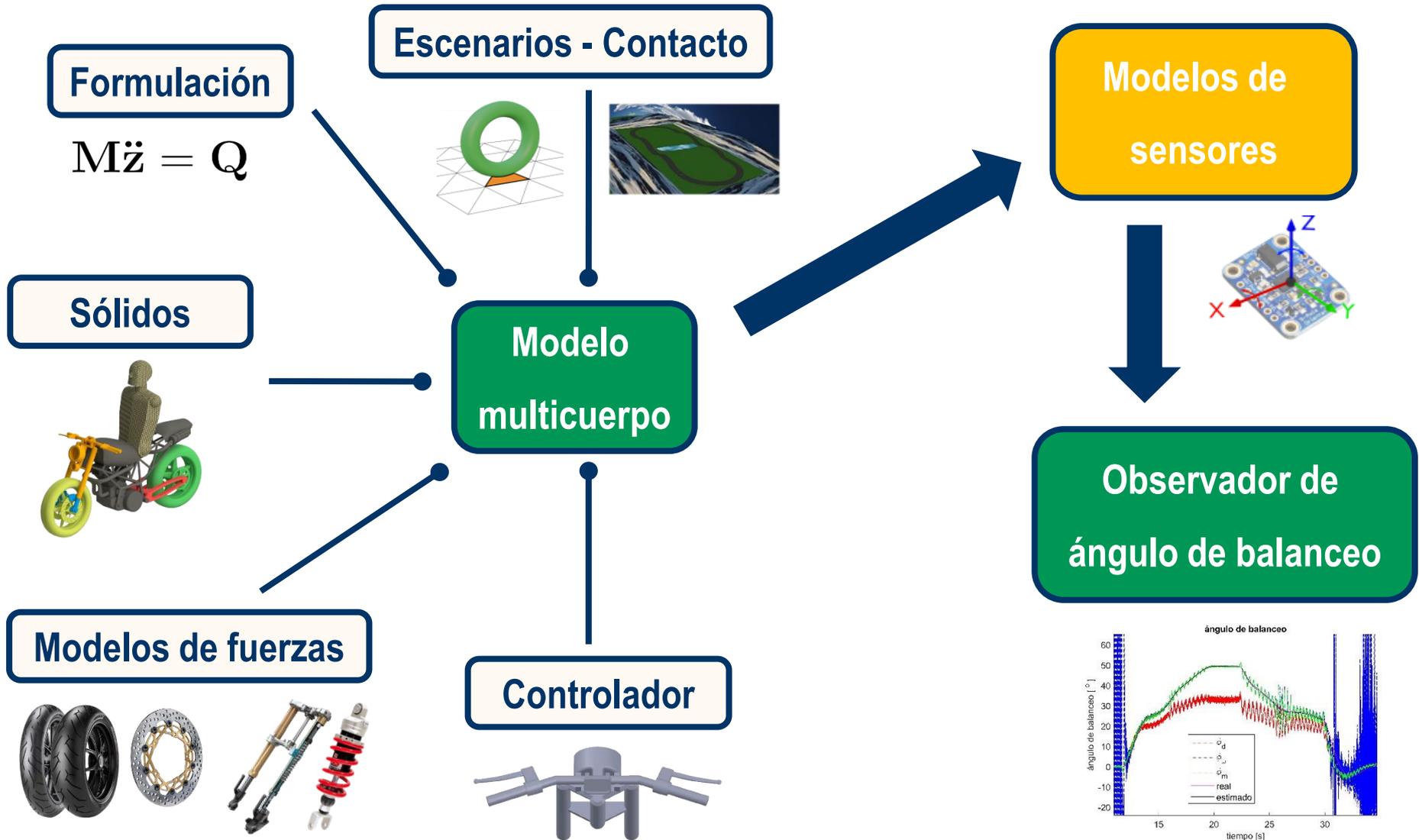
Marzo 2021



Objetivos

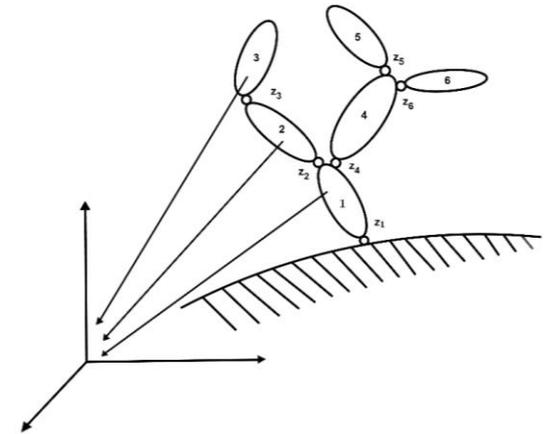
- **Implementación del observador de estados en un modelo de simulación multicuerpo de motocicleta**
 - Construcción de un modelo de simulación multicuerpo de motocicleta con conductor
 - Implementación de un controlador que permita la realización de maniobras en condiciones de estabilidad
 - Modelización de sensores necesarios para implementar el observador de estados del ángulo de balanceo del vehículo

Estructura del proyecto



Formulación

- Empleo de biblioteca *Biolim*
- Coordenadas relativas independientes
- Regla trapezoidal como integrador
- Paso de tiempo fijo
- Velocidad de resolución de la dinámica del sistema superior a tiempo real



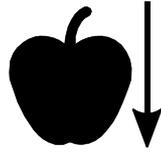
Sólidos

- Sistema con 7 sólidos y 12 GDL
- Geometría a partir de modelo CAD
- Propiedades de masa e inercia a partir de bibliografía
- Definición mecanismo mediante archivo XML: masa, COM, I, R0, u0
- Sistema de ejes



Modelos de fuerzas

■ Gravedad



■ Frenos



- Modelo de fricción seca

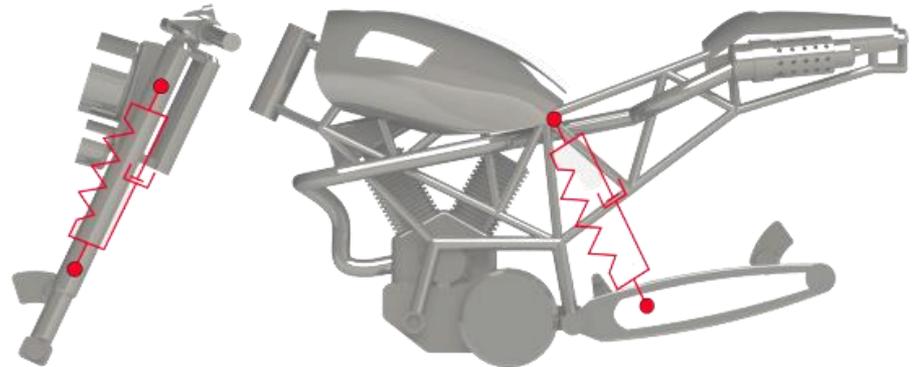
- Modelo de muelle amortiguador $\tau_{fr} = K(\alpha - \alpha_0) + C\omega$

■ Motor



■ Suspensiones

$$F = -K(x - x_0) - C\dot{x}$$



Modelos de fuerzas

- Par en la dirección

- Neumáticos

- Modelados como toroides
- Fuerza normal \longleftrightarrow Contacto

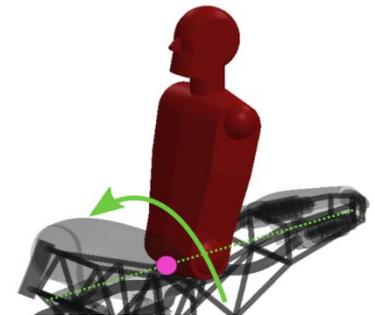
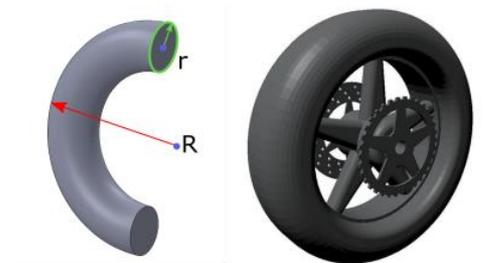
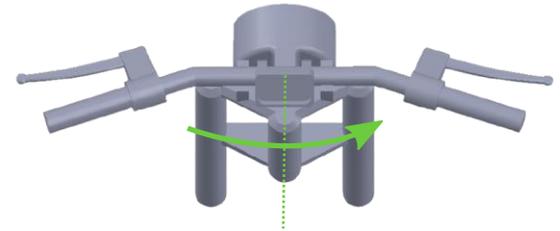
$$\mathbf{F}_n = K\delta - C \dot{\mathbf{r}}_c \cdot \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|}$$

- Fuerzas tangenciales \longleftrightarrow Modelo *TMeasy*

$$F_x^D \simeq c_x x_e + d_x \dot{x}_e$$

$$F_y^D \simeq c_y y_e + d_y \dot{y}_e$$

- **Torso:** influencia del conductor



Modelos de sensores

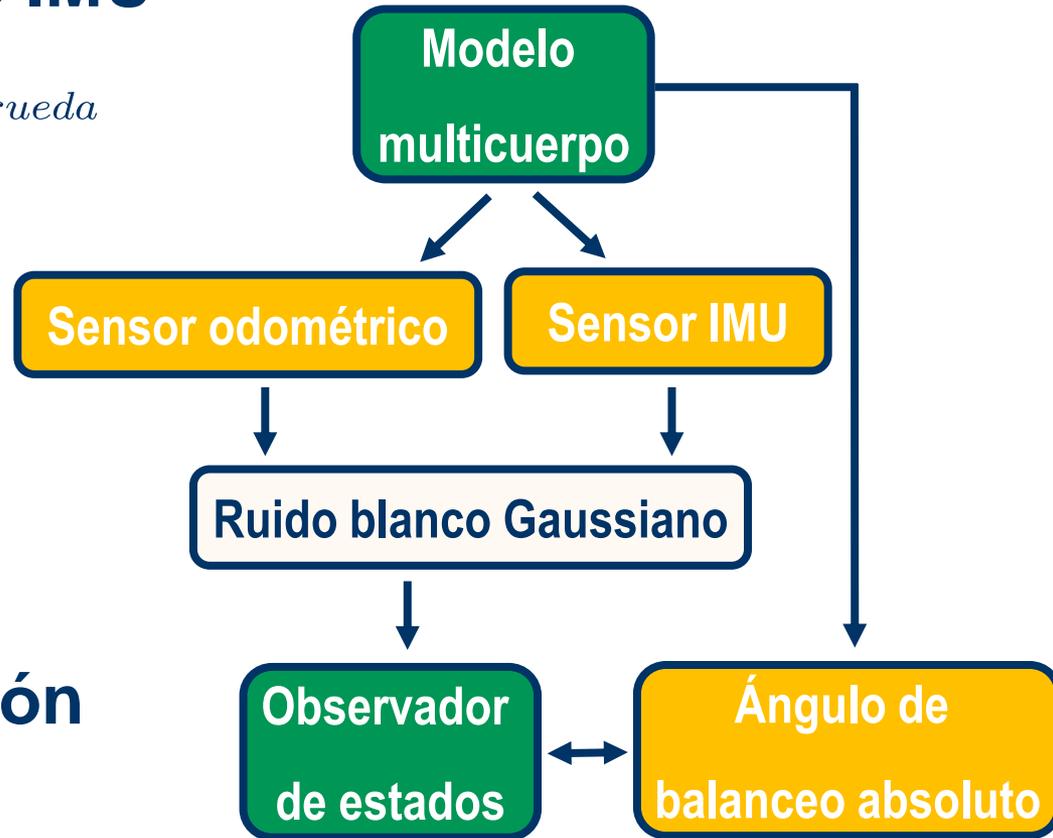
▪ Sensor odométrico e IMU

$$\omega_{rueda} \rightarrow v_{long} = \omega_{rueda} r_{rueda}$$
$$\omega_x^{ch}, \omega_y^{ch}, \omega_z^{ch}$$

▪ Adición de ruido

$$\omega_{IMU}^{obs} = \omega_{IMU}^{mc} + R_{IMU} N$$
$$\omega_{rueda}^{obs} = \omega_{rueda}^{mc} + R_{rueda} N$$

▪ Empleo de información en el filtro de Kalman



Controladores del modelo

■ Control longitudinal

- Fases de aceleración y frenada
- Evaluación de trayectoria en adelanto
- Acotado por ϕ_{max} y V_{max} en cada escenario

$$V_{max} = \sqrt{\frac{g \tan \phi_{max}}{\kappa}}$$
$$accel = K_{accel} (V_{max} - V_i)$$
$$fr = K_{fr} (V_i - V_{max})$$

■ Control torso

$$\alpha_{obj} = 0.5 \cdot F \cdot \phi_{veh}$$
$$\varepsilon = \alpha_{obj} - \alpha_{torso}$$
$$\tau_{torso} = K \varepsilon - C \dot{\alpha}_{torso}$$



Controladores del modelo

▪ Controlador lateral

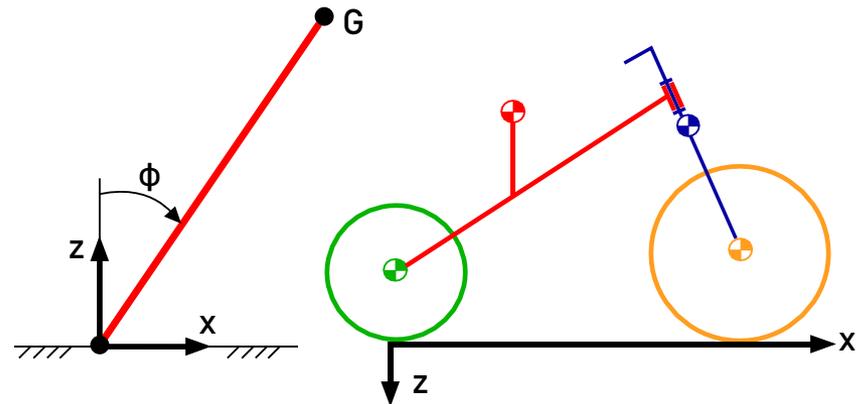
- Controlador LQR \longleftrightarrow necesidad de un modelo
- Dos modelos implementados
- Adaptación de sólidos a modelo de Whipple

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + R u^2) dt$$

$$u = -\mathbf{K} \mathbf{x}$$

$$\mathbf{x} = [\phi \quad \delta \quad \dot{\phi} \quad \dot{\delta} \quad \xi]^T$$

$$\tau_{dir} = -\mathbf{K} \mathbf{x} + 10 \cdot \dot{\delta}$$



Controladores del modelo

▪ Seguimiento de trayectorias

- Creadas a partir de curvas *spline*
- Punto de referencia ligado al chasis
- Función de la velocidad del vehículo

$$refPos_x = 0.75 \sqrt{vel_{chasis,x}^2 + vel_{chasis,y}^2}$$

$$refPos_z = 0.1 \cdot refPos_x$$

- Conocer situación vehículo en el escenario
- Evaluación del error de posición, orientación y velocidad de la moto

Escenarios del modelo

- 6 escenarios creados, planos y no planos
- Empleo de software CAD y de modelado 3D
- Malla para contacto y exportación de trayectoria
- Representación mediante *MBSModel*
- Adición de texturas para añadir realismo

Escenarios planos

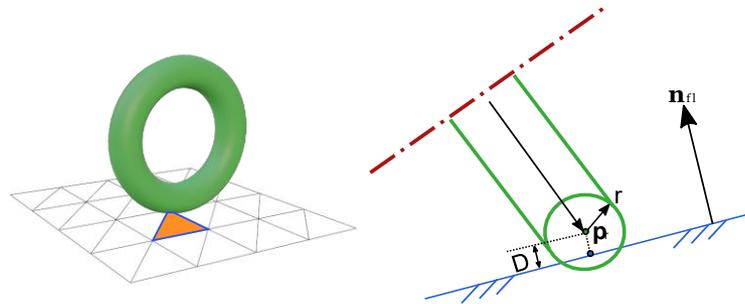


Escenarios no planos



Problema de contacto

- Toroide analítico contra malla de triángulos
- Particionamiento del espacio
- Dos evaluaciones para determinar el contacto
 - si punto de mínima distancia está dentro del triángulo
 - si existe contacto del toroide con una arista



- Indentación permite el cálculo de fuerzas de neumático

$$\delta = (\mathbf{n}_{fl} \cdot \mathbf{p}_r + D) - r$$

Observador de estados

■ Filtro de Kalman

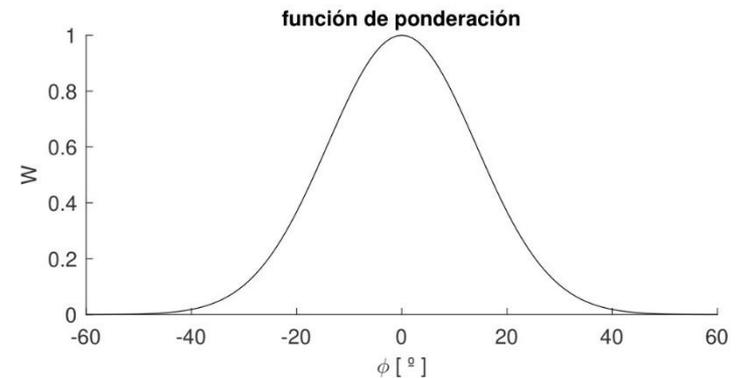
■ Predicción

$$\begin{bmatrix} \hat{\phi} \\ \hat{b}_x \end{bmatrix}_k^- = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\phi} \\ \hat{b}_x \end{bmatrix}_{k-1}^+ + \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix} \omega_{x,k-1}^B$$

■ Corrección

$$\phi_d = \arctan\left(\frac{\dot{\psi}v}{g}\right)$$

$$\phi_\omega = \text{sgn}(\omega_z^B) \arcsin\left(\frac{\omega_y^B}{\sqrt{(\omega_y^B)^2 + (\omega_z^B)^2}}\right)$$



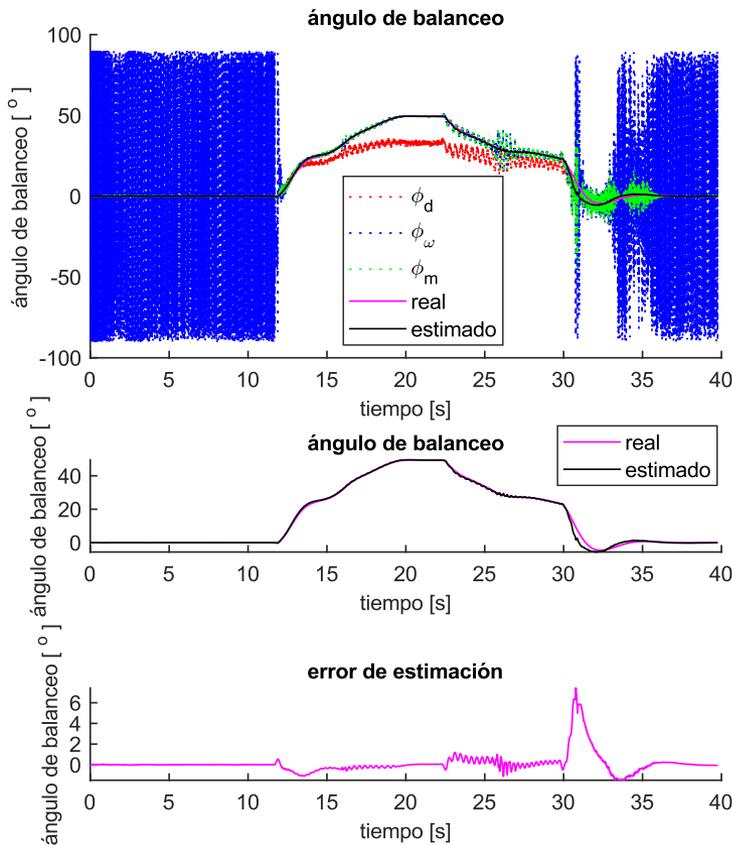
$$W = \exp(-C^2 \hat{\phi}^2)$$

$$\phi_m = W \phi_d + (1 - W) \phi_\omega$$

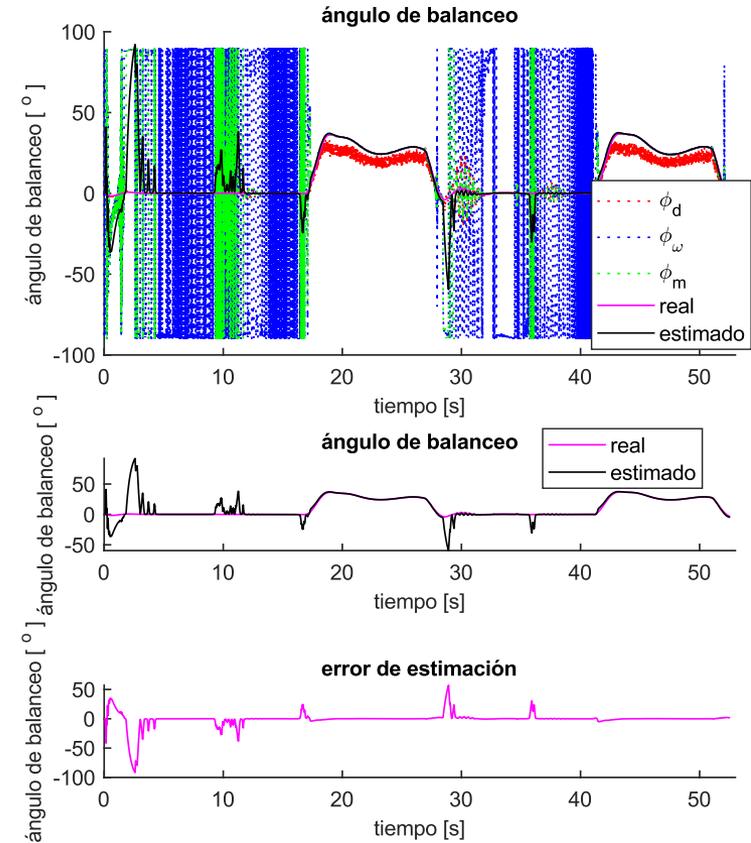
Resultados

■ Valores originales

$$\Sigma^P = \begin{bmatrix} 5 \times 10^{-7} & 0 \\ 0 & 1 \times 10^{-8} \end{bmatrix}, \Sigma^S = 0.1, C = 0.05$$



Straight track

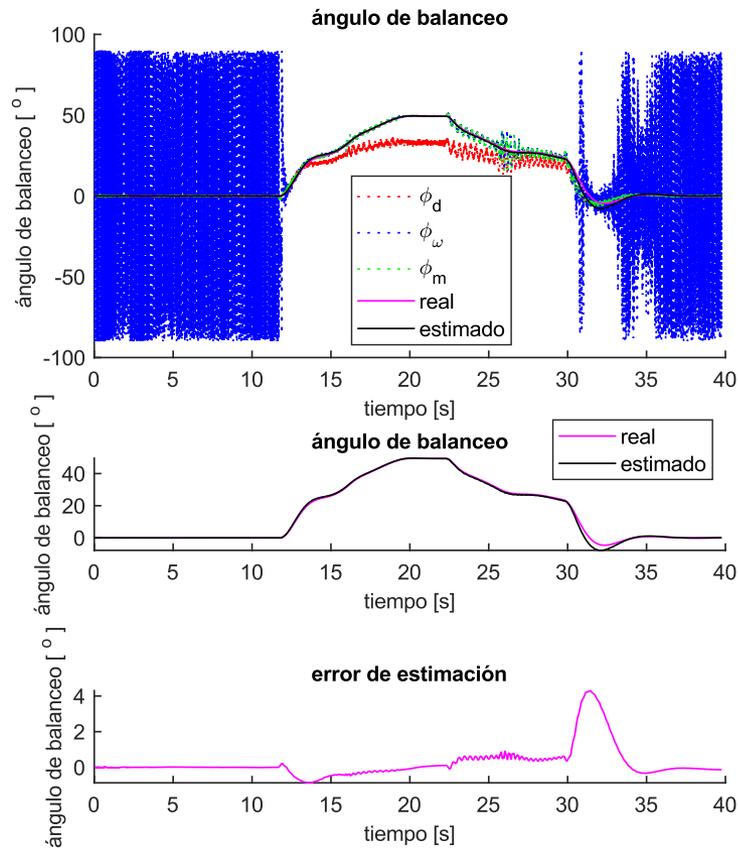


Slope track

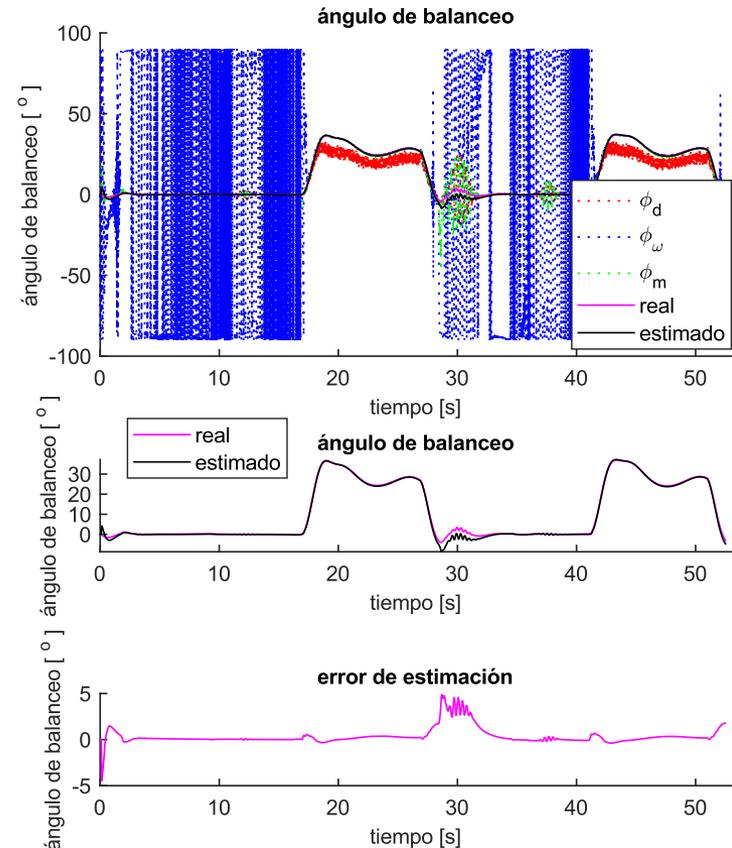
Resultados

■ Valores modificados

$$\Sigma^S = 1.5, C = 0.2, W = \exp(-C^2 \hat{\phi}^2)$$



Straight track



Slope track

Resultados

■ Mejora notable de resultados en estimaciones

Escenario	$RMSE_{orig}$ (°)	$RMSE_{mod}$ (°)	Mejora (%)
<i>straight track</i>	1.0132	0.9252	8.69
<i>circular track</i>	2.1938	1.0966	50.01
<i>DLC track</i>	1.3233	0.8463	36.05
<i>slope track</i>	11.9392	0.9577	91.98
<i>garage track</i>	6.0933	2.6901	55.85
<i>bend track</i>	11.9682	2.6697	77.69

■ Visualización de maniobras

Maniobras estimación ángulo balanceo

Trabajo Fin de Máster

Gracias por su atención

Autor:

Diego Maceira Muíños

Tutores:

Emilio Sanjurjo Maroño

Alberto Luaces Fernández

Marzo 2021

