
Desarrollo, implementación y validación experimental de un observador de estados para vehículos de radiocontrol

Autor Andrés Vázquez Porta

Tutor Urbano Lugrís Armesto

Cotutor Emilio Sanjurjo Maroño

Índice

1. Motivación y Alcance
2. Plataforma experimental
3. Modelado y Arquitectura
4. Detector de Derrape
5. Metodología Experimental
6. Resultados
7. Discusión
8. Conclusiones
9. Futuras mejoras
10. Objetivos a largo plazo

Motivación

Conducción autónoma a escala: el ecosistema F1TENTH

¿Por qué utilizar plataformas a escala (1:10)?

- ▶ **Ecosistema F1TENTH:** Estándar internacional en investigación de conducción autónoma de alta velocidad.
- ▶ **Entorno seguro y accesible:** Permite validar algoritmos de control y estimación complejos sin los riesgos económicos ni físicos de un vehículo real.
- ▶ **El reto actual:** Maximizar el rendimiento dinámico del vehículo.



Motivación

El reto dinámico: pérdida de adherencia

En conducción al límite, la sensorización básica no redundante de estas plataformas no logra identificar situaciones de **derrape**.

Limitaciones del hardware estándar:

- ▶ Los **encoders** asumen rodadura perfecta en las ruedas.
- ▶ La **IMU** tan solo registra aceleraciones y velocidad de rotación (ω).
- ▶ El **LIDAR** tiene una tasa de muestreo demasiado baja para estimar un derrape en base al movimiento relativo del vehículo respecto al entorno mapeado.

Motivación

La barrera económica en la investigación

Las plataformas de desarrollo autónomo estándar de alto rendimiento conllevan una inversión económica fuera del presupuesto de la inmensa mayoría de laboratorios universitarios.

Costes asociados a F1TENTH estándar:

- ▶ Sensores de percepción principal (**LiDAR industriales**): Desde 1.000€ hasta más de 3.000€.
- ▶ Unidades de procesamiento a bordo de alta gama (GPUs integradas): 400€ - 800€.

El obstáculo resultante:

- ▶ Centralización de la investigación en grandes instituciones.
- ▶ Dificultad para reproducir y testear plataformas de forma autónoma o DIY a bajo coste.

Motivación

Planteamiento y objetivos del TFG

Hipótesis de investigación

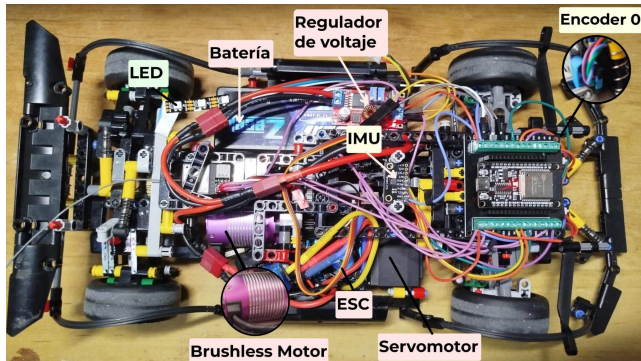
Es posible diseñar una arquitectura alternativa que permita la estimación del derrape de forma precisa utilizando componentes de bajo coste.

Objetivos principales

- ▶ Desarrollar una plataforma capaz de **medir el derrape** en tiempo real.
- ▶ Implementar un **Filtro de Kalman Extendido (EKF)** fusionando odometría óptica de alta frecuencia y de bajo coste.

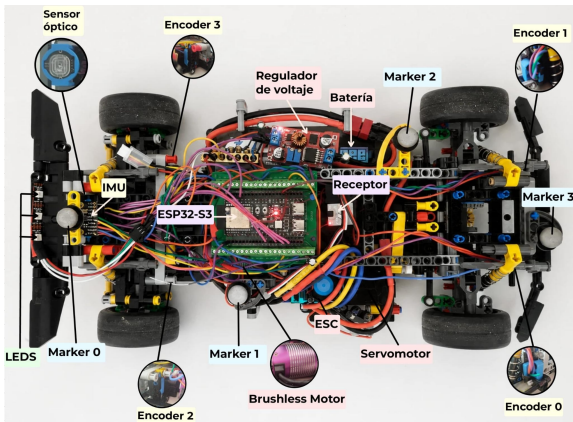
Plataforma experimental

Primer prototipo funcional



Plataforma experimental

Plataforma final



Plataforma experimental

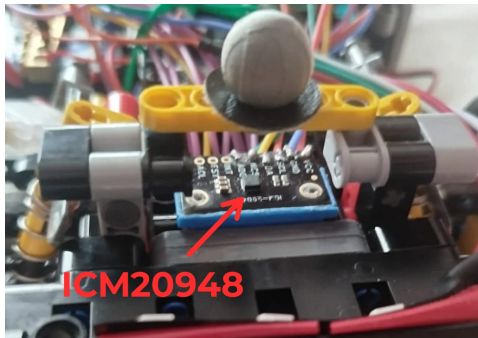
Chasis y configuración

- ▶ **Chasis:** construido íntegramente con piezas de Lego, partiendo de cero.
- ▶ **Configuración:** tracción total (AWD) con diferenciales en ambos ejes.
- ▶ **Dirección:** geometría Ackermann, caster $\approx 6^\circ$, camber $-0,5$, giro máx. $\approx 25^\circ$.
- ▶ **Suspensión modificada:** altura libre reducida (≈ 8 mm) para mejor comportamiento de conducción.
- ▶ **Distribución de pesos:** centro de masas ≈ 1 cm por detrás del centro geométrico.
- ▶ **Electrónica integrada:** motor brushless, ESC, servomotor, receptor RC y ESP32-S3.

Plataforma experimental

Unidad de Medida Inercial (IMU)

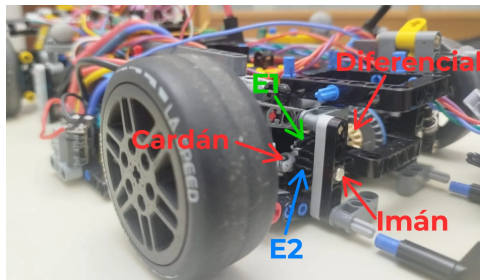
- ▶ **Modelo:** ICM-20948.
- ▶ **Función:** medir aceleraciones lineales (a_x , a_y) y velocidad angular de guiñada (ω).
- ▶ **Interfaz:** SPI a 1 MHz (bus 2).
- ▶ **Montaje:** sobre soporte rígido alineado con el chasis, en la parte trasera del vehículo.
- ▶ **Corrección aplicada:** escala de ± 500 dps y sin filtrado.



Plataforma experimental

Encoders magnéticos (MT6701)

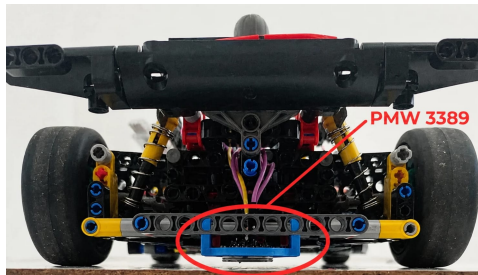
- **Modelo:** MT6701 (efecto Hall).
- **Cantidad:** 4 unidades, una por rueda.
- **Función:** medir la velocidad de rotación de cada rueda.
- **Solución mecánica:** par de engranajes en perpendicular a la salida del diferencial para transmitir el movimiento a un eje auxiliar con el imán.
- **Interfaz:** PCNT a 100 kHz (bucle principal).



Plataforma experimental

Flujo óptico (PMW3389)

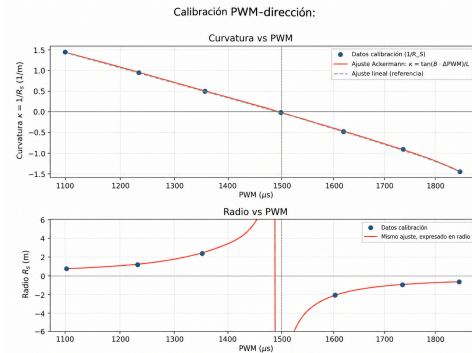
- ▶ **Modelo:** PMW3389 (para ratón óptico)
- ▶ **Función:** medir desplazamiento relativo.
- ▶ **Distancia de trabajo:** 2–3 mm (crítica).
- ▶ **Interfaz:** SPI a 100 kHz (bus 1).
- ▶ **Calibración:** factor de escala $k_{\text{opt}} = 3,0$, calculado por mínimos cuadrados contra OptiTrack.
- ▶ **Montaje clave:** anclado a los bujes traseros para una distancia al suelo constante.



Plataforma experimental

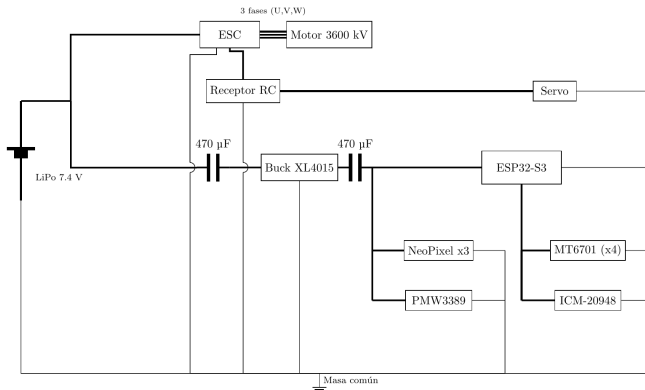
PWM de dirección (receptor RC)

- **Fuente:** señal PWM del receptor de radio, capturada por el ESP32.
- **Rango típico:** 1106–1846 μs ; centro en 1481 μs .
- **Relación PWM $\leftrightarrow$ radio de giro:** calibrada experimentalmente con cámaras Nokov (trayectorias circulares).
- **Interpolación:** se interpola en **curvatura** $\kappa = 1/R_S$, evitando la asíntota del radio en recta.



Plataforma experimental

Esquema eléctrico del vehículo



Modelado y Arquitectura

Modelado del sistema

Modelo cinemático 2D (punto del sensor)

$$\dot{v}_x = a_x + \omega v_y$$

$$\dot{v}_y = a_y - \omega v_x$$

Vector de estados del EKF (6 variables)

$$\mathbf{x} = [v_x, v_y, a_x, a_y, \omega, \dot{\omega}]^T$$

Los ejes del vehículo y del sensor se toman tal y como se muestran en la imagen de la derecha.

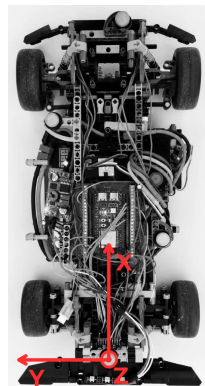


Figura: Definición de ejes del vehículo/sensor.

Modelado y Arquitectura

Arquitectura del sistema

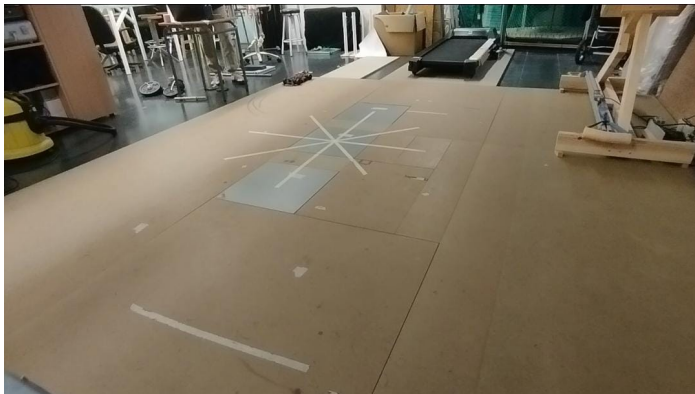
- ▶ **Detector de derrape:** embarcado en el ESP32 a 100 Hz, sobre medidas crudas de la IMU.
- ▶ **Observador (EKF):** ejecutado *offline* sobre los datos registrados (EKF + OptiTrack sincronizados).
- ▶ **Comparación con el EKF:** para validar la detección, se simula *offline* el mismo código del detector de derrape sobre las estimaciones del EKF, de modo que ambos resultados puedan compararse en igualdad de condiciones.

Detector de Derrape

- ▶ **Objetivo:** detectar la pérdida de adherencia lateral de forma inmediata.
- ▶ **Doble criterio (OR):**
 1. **Exceso de yaw rate:** $|\omega_{\text{med}}| > 3,5 \cdot |v_x / R_S|$.
 2. **Ángulo de deriva elevado:** $|\beta| > 15^\circ$.
- ▶ **Lógica:** máquina de estados con histéresis y confirmación temporal (200 ms).
- ▶ **Salida:** 3 LEDs (verde, naranja, rojo).
- ▶ **Calibración:** umbrales ajustados experimentalmente mediante calibración por fases:
 1. Calibración del **criterio de exceso de yaw rate** sin criterio de ángulo de deriva.
 2. Calibración del **criterio de ángulo de deriva** sin criterio de exceso de yaw rate.

Metodología Experimental

Escenario de pruebas



Metodología Experimental

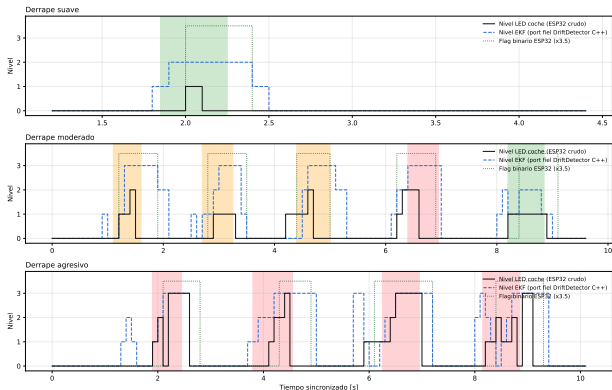
Adquisición y calibración

- ▶ **Experimentos:** 4 regímenes (sin derrape, suave, moderado, agresivo).
- ▶ **Adquisición:**
 - ▶ **ESP32:** sensores a 100 Hz por WiFi (UDP).
 - ▶ **OptiTrack:** ground truth a 100 Hz.
- ▶ **Sincronización:** primer movimiento + correlación cruzada.
- ▶ **Calibración clave:**
 - ▶ Dirección: PWM $\leftrightarrow$ radio de giro (interpolación en curvatura).
 - ▶ Flujo óptico: $k_{\text{opt}} = 3,0$ por mínimos cuadrados contra OptiTrack.
 - ▶ IMU: corrección de sensibilidad.

Resultados

Detección de derrape: EKF vs OptiTrack vs Sensor Óptico

Detección de derrape: crudo ESP32 vs EKF (mismo detector C++)



Discusión

Naturaleza anticipativa del observador

Observación clave

Los flancos de subida del detector basado en EKF aparecen **sistemáticamente antes** que los del detector embarcado en el ESP32. La hipótesis es que esto no es un error: es un efecto de **menor latencia** del observador.

¿Por qué ocurre?

Ambos detectores aplican **el mismo criterio** de persistencia (200 ms de derrape sostenido). La diferencia no está en el umbral, sino en la entrada:

- ▶ El detector embarcado consume señales **crudas**, con ruido y picos, que retrasan la superación sostenida del umbral.
- ▶ El detector simulado sobre el EKF consume señales **filtradas**, limpias, que cruzan el umbral antes y de forma consistente.

Discusión

Naturaleza anticipativa del observador

Consecuencia sobre el RMSE

Al comparar muestra a muestra contra el ground truth, el ligero adelanto del EKF introduce un **sesgo sistemático** que penaliza su RMSE, sin que ello implique menor calidad de la estimación.

Aclaraciones metodológicas

- ▶ El **modelo cinemático** es válido en cualquier régimen: no pierde validez durante el derrape. Lo que cambia es la relación entre medida y neumático, no la formulación del modelo.
- ▶ El factor $k_{\text{opt}} = 3,0$ **no favorece al flujo óptico** frente al EKF, porque el observador consume esa misma medida ya calibrada. Ambos parten de la misma fuente primaria escalada.

Discusión

Limitaciones observadas

- ▶ Espacio de prueba reducido.
- ▶ Bajo número de pruebas.
- ▶ Necesidad de un suelo perfectamente liso y con textura.
- ▶ Validación offline del EKF
- ▶ Sensibilidad a los parámetros Q y R .
- ▶ Sincronización temporal con OptiTrack.

Conclusiones

- ▶ **Decisión clave:** anclar el flujo óptico a los bujes traseros garantiza la distancia al suelo y convierte un sensor problemático en la mejor fuente de velocidad.
- ▶ **Observador:** EKF de 6 estados. RMSE global de 0.461 m/s (v_x), 0.265 m/s (v_y) y 0.336 rad/s (ω).
- ▶ **Datos crudos vs Kalman:** el EKF entrega señales filtradas que, ajustadas a la misma persistencia que el detector embarcado, penalizan su RMSE sin comprometer la estimación.
- ▶ **Detector de derrape:** Pese al reducido espacio y bajo número de pruebas, el detector ha presentado un 100 % de exhaustividad, 0 falsos negativos en 10 episodios reales.
- ▶ **Conclusión final:** sistema de percepción completo, reproducible y de bajo coste, validado experimentalmente.

Futuras mejoras

- ▶ **Incorporación de nuevas fuentes de información**
 - ▶ **Encoders delanteros:** implementar los encoders de las ruedas delanteras para detectar patinaje o bloqueo. Esta incorporación habilitaría la detección de deslizamiento longitudinal, complementando la detección de derrape lateral.
 - ▶ **Señal PWM del receptor RC:** incorporarla al vector de estados y al modelo físico mediante la ecuación cinemática empleada en el detector de derrape. De este modo, el EKF podrá ponderarla junto al resto de sensores y mejorar la estimación del resto de estados.
- ▶ **Implementación embarcada del EKF:** ejecutar el observador completo de seis estados sobre el propio microprocesador, cerrando el lazo de control a bordo del vehículo sin depender del procesado offline.

Objetivos a largo plazo

- ▶ **Control de derrape voluntario:** emplear el estado estimado para mantener un ángulo de deriva (*slip angle*) objetivo de forma controlada.
- ▶ **Implementación de Inteligencia Artificial:** utilizar los datos de odometría de alta frecuencia y los indicadores matemáticos de derrape generados en este trabajo como variables de entrada para un algoritmo de Aprendizaje por Refuerzo (RL), permitiendo al vehículo aprender estrategias óptimas de contravolante y tracción.
- ▶ **Arquitectura Ciberfísica Global de Bajo Coste:** desplegar un sistema de posicionamiento absoluto mediante una cámara cenital (en techo o dron) conectada a una estación de procesamiento remoto (*edge computing*), eliminando la necesidad de LiDARs industriales y permitiendo un entorno de pruebas competitivo DIY equivalente a una de F1TENTH por una fracción del coste.