

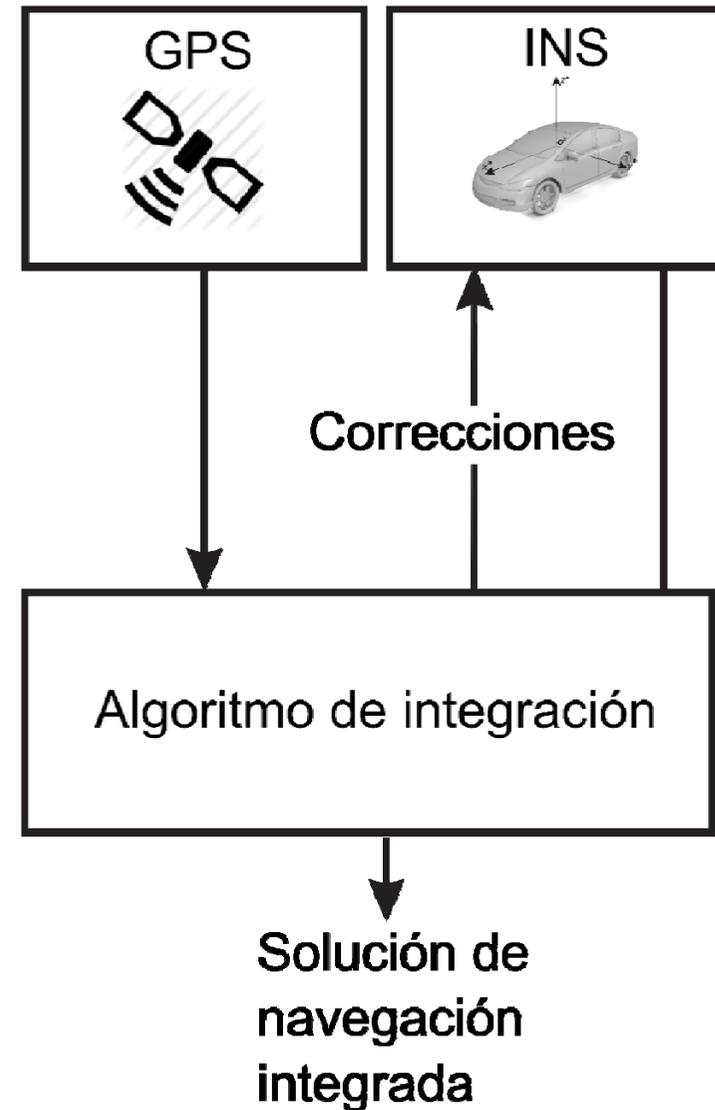
Trabajo fin de Grado

Integración mediante filtro de Kalman de sensores inerciales y GPS para la estimación de la posición de un vehículo

- Autor:
 - Alejandro Vázquez Fraga
- Tutores:
 - Miguel Ángel Naya Villaverde
 - Emilio Sanjurjo Maroño
- Septiembre, 2014

Introducción

- **Sistemas de navegación**
 - Navegación inercial, INS
 - Navegación por satélite, GPS
- **Localización de un vehículo**
 - Se desconoce el espacio en el que se mueve
 - Se desconoce la interacción con el medio
- **Integración de sistemas**
 - Bajo coste
 - Mejora de la precisión
 - Filtro de Kalman
 - Distintos sistemas de coordenadas



Comparativa entre los sistemas de navegación

NAVEGACIÓN POR SATÉLITE

- Ventajas
 - Solución fiable a largo plazo
 - Bajo coste relativo a su fiabilidad
 - Alta precisión en velocidad
- Inconvenientes
 - Baja frecuencia de muestreo
 - Baja precisión en el posicionamiento
 - Señales susceptibles a interferencias

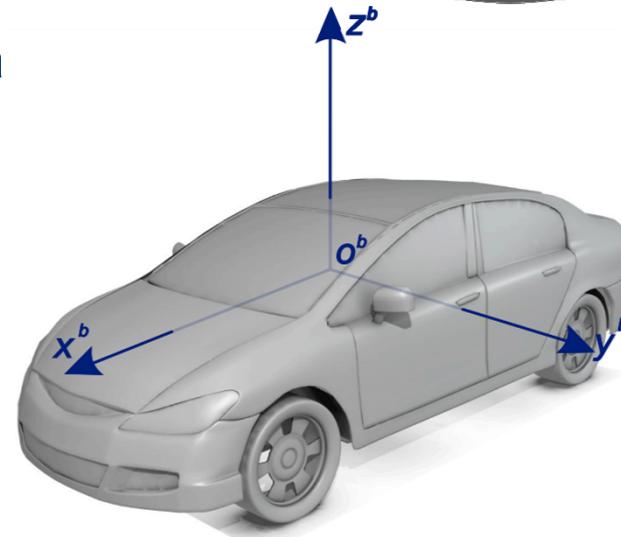
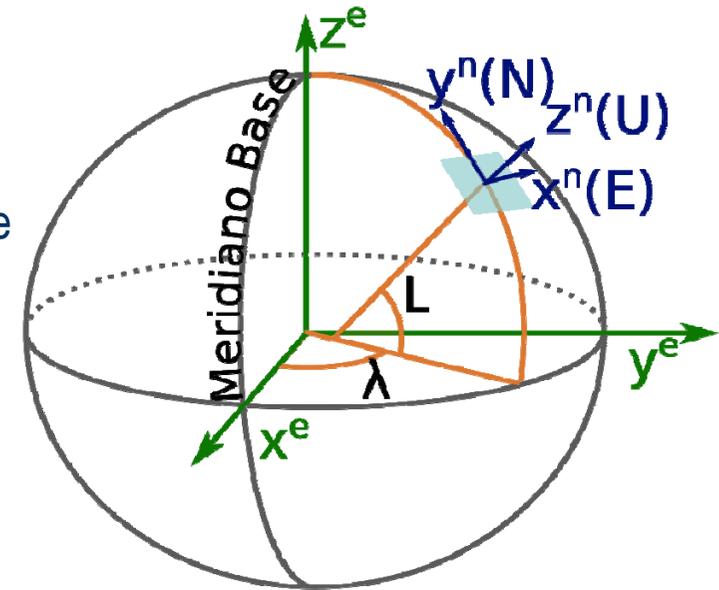
SENSORES INERCIALES

- Ventajas
 - Alta frecuencia de muestreo
 - Ruido muy bajo a corto plazo
 - Mayor información dinámica
 - Independiente de referencias externas
- Inconvenientes
 - Degradación de la solución en el tiempo
 - Coste elevado en equipos precisos
 - Alto consumo y tamaño en equipos precisos

Navegación

SISTEMAS DE COORDENADAS:

- WGS 84 \Rightarrow Modelo de elipsoide de la superficie terrestre
 - Latitud, L
 - Longitud, λ
 - Altitud
- ECEF, e \Rightarrow Ejes fijos con respecto a la Tierra
- ENU, n \Rightarrow Sistema Local
- Cuerpo, b \Rightarrow Fijo al vehículo



GPS

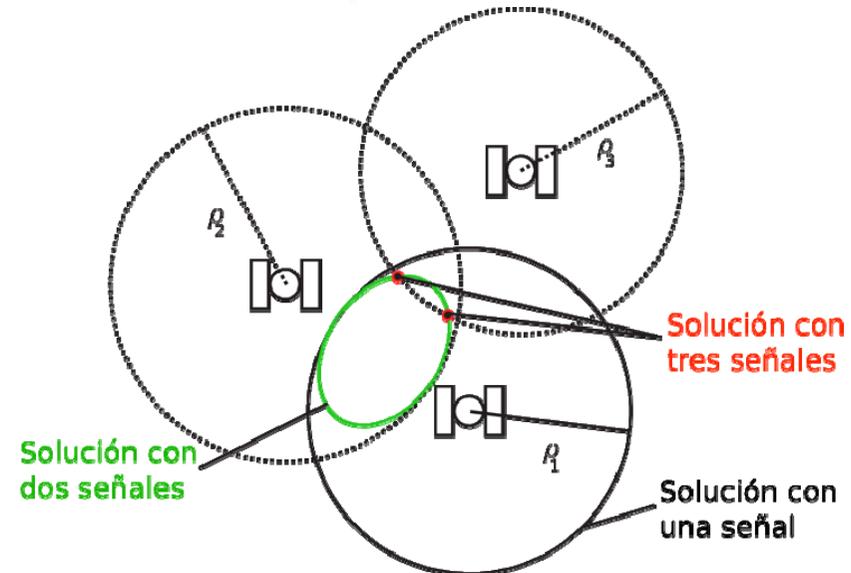
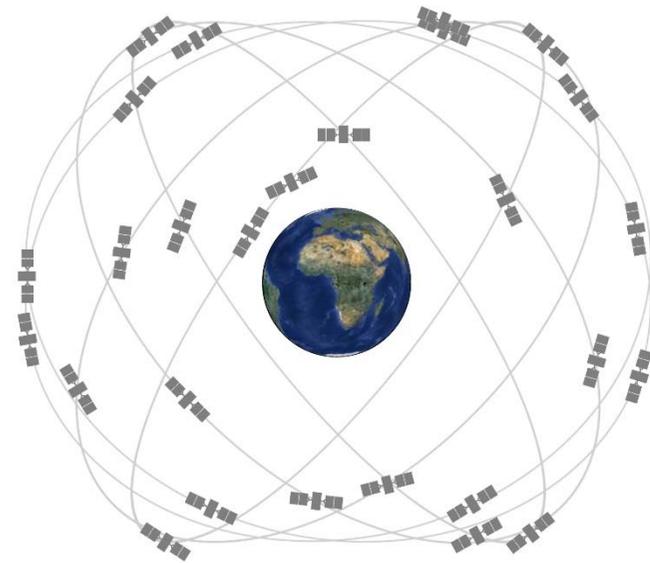
- 24 Satélites en órbitas de radio 26,600 km
- Rangos \Rightarrow Posicionamiento 3D
- Rango: Distancia entre satélite y receptor

$$\rho_j = (t_{sa,j} - t_{st,j})c$$

- Error en la medición de la distancia

$$\delta\rho_j = (\delta t_{rc} - \delta t_{sj})c = \tilde{\rho}_{Rj} - \rho_j$$

- Efecto Doppler \Rightarrow Velocidad



Navegación inercial



- Mediciones del IMU → Sistema de coordenadas del cuerpo
- Es necesario un modelo gravitacional → WGS 84
- Es necesario conocer posición, velocidad y orientación iniciales
- Se obtiene posición, velocidad y orientación por integración de las mediciones del IMU



Navegación inercial

- Actualización de la orientación

$$\mathbf{C}_b^n(t + \tau_i) = \mathbf{C}_b^n(t) \exp\left(\int_t^{t+\tau_i} \boldsymbol{\Omega}_{ib}^b dt\right)$$

- Conversión de sistema de la fuerza específica

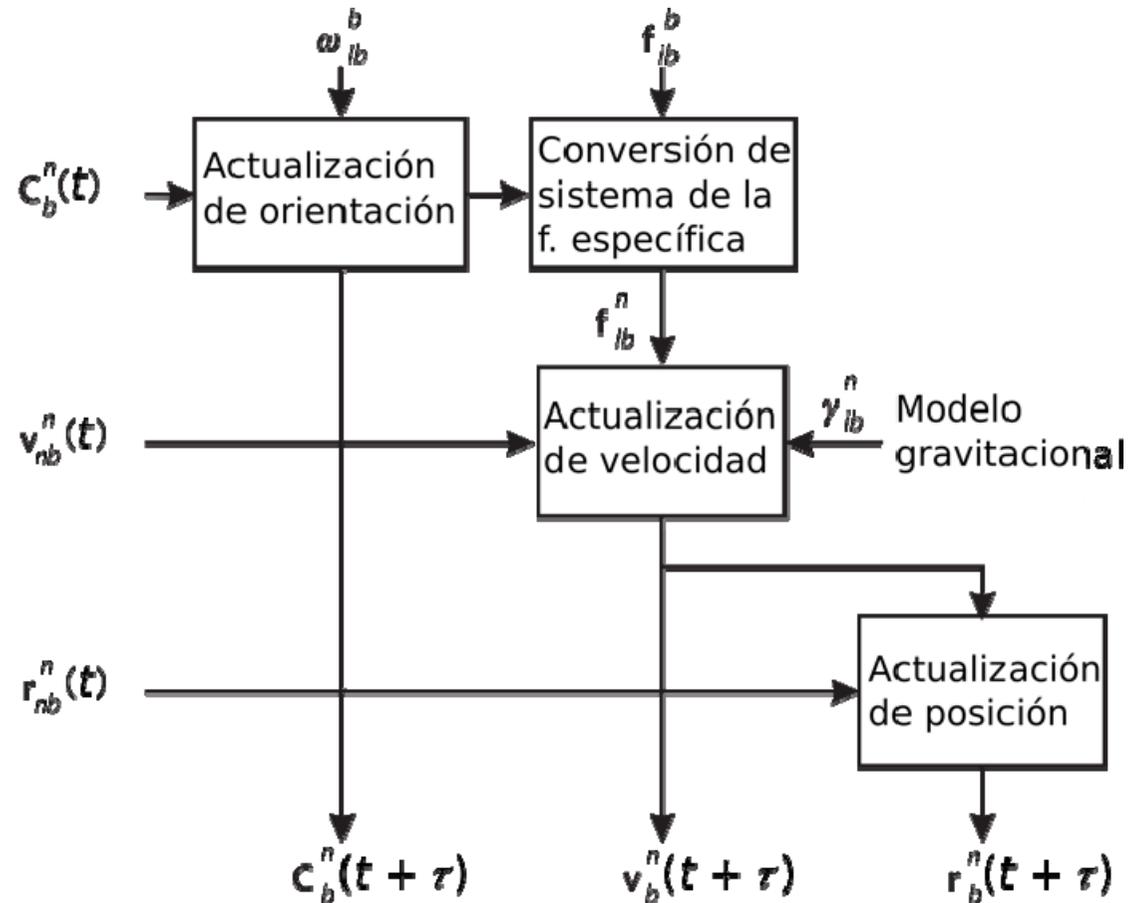
$$\mathbf{f}_{ib}^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{f}_{ib}^b$$

- Actualización de la velocidad

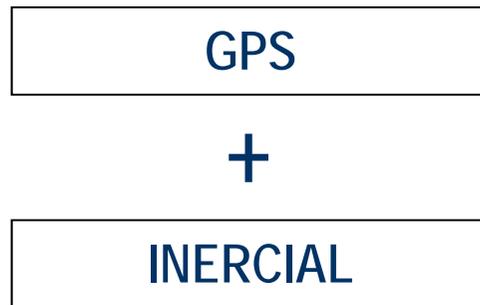
$$\mathbf{v}_{nb}^n(t + \tau_i) = \mathbf{v}_{nb}^n(t) + (\mathbf{C}_b^n \mathbf{f}_{ib}^b + \boldsymbol{\gamma}_{ib}^n) \tau_i$$

- Actualización de la posición

$$\mathbf{r}_{nb}^n(t + \tau_i) = \mathbf{r}_{nb}^n(t) + \mathbf{v}_{nb}^n(t + \tau_i) \tau_i$$



Objetivo de la integración de GPS/INS

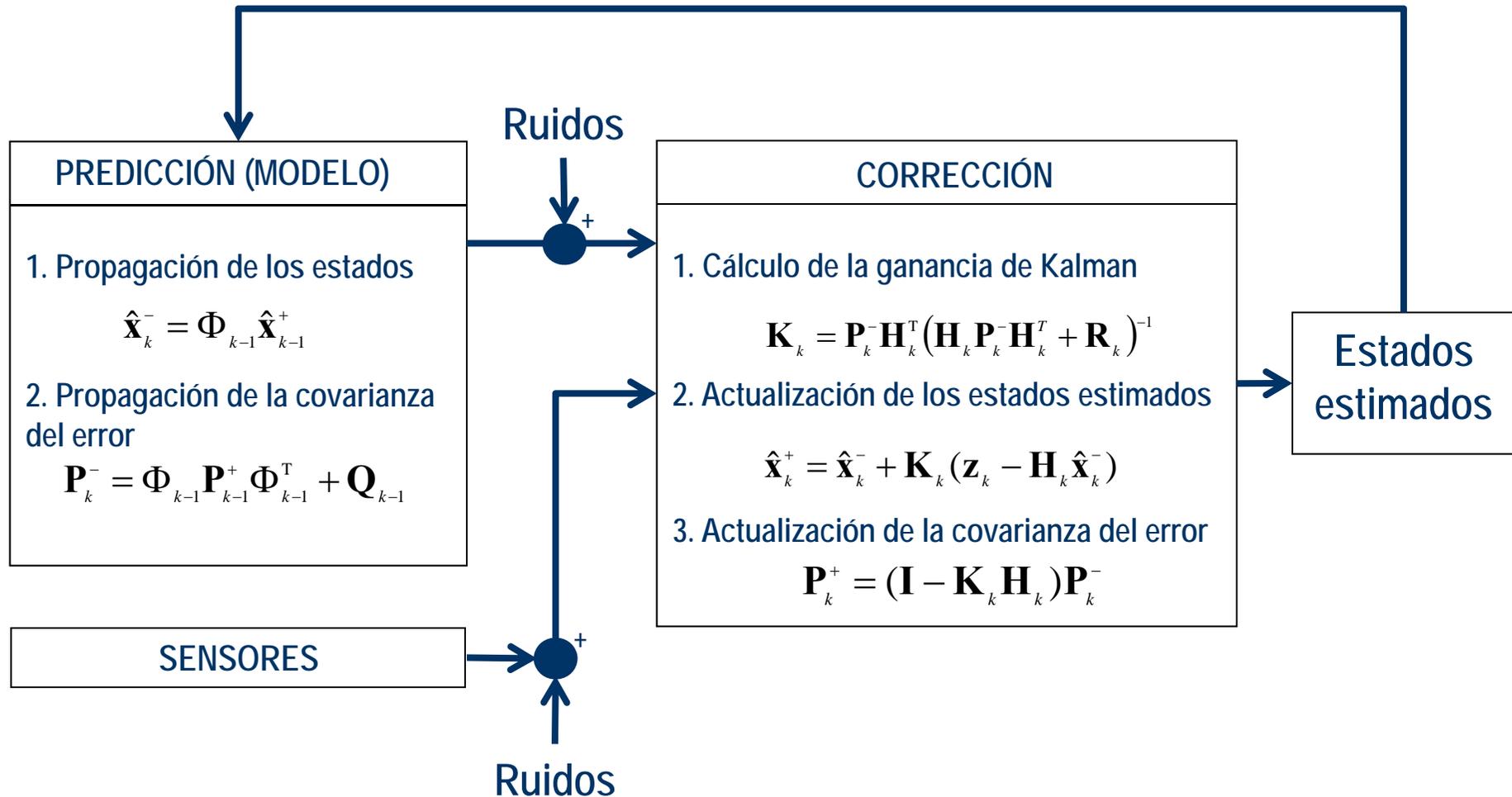


- Solución fiable a largo plazo
- Alta frecuencia de muestreo
- Bajo ruido a corto plazo
- Mayor información dinámica
- Bajo coste
- Mayor precisión

Filtro de Kalman

- Técnica de estimación Bayesiana
- Estimador recursivo
 - No es necesario reprocesar toda la información en cada paso de tiempo.
- Realiza estimaciones óptimas de los estados del sistema
 - Determina la incertidumbres sobre las estimaciones.
 - Asume que el sistema es lineal.
 - Asume que todos los ruidos son ruidos blancos Gaussianos.
- Basa sus estimaciones en $\left\{ \begin{array}{l} \text{Modelo matemático del sistema} \\ \text{Mediciones de los sensores} \end{array} \right.$

Filtro de Kalman



Integración GPS/INS mediante KF

- Loosely Coupled
 - Utiliza el GPS como sensor
 - Implementable con cualquier equipamiento

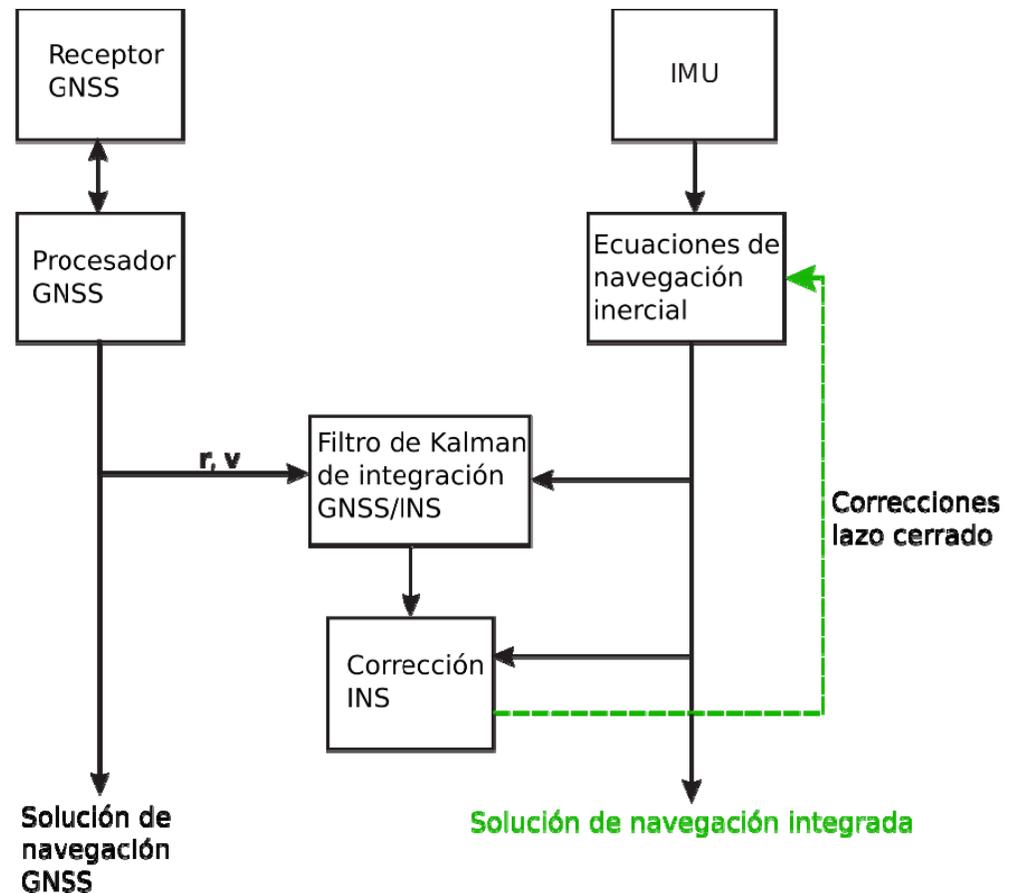
Filtro de Kalman indirecto

$$\mathbf{x}_{INS}^e = \begin{pmatrix} \delta\psi_{eb}^e \\ \delta\mathbf{v}_{eb}^e \\ \delta\mathbf{r}_{eb}^e \\ \mathbf{b}_a \\ \mathbf{b}_g \end{pmatrix}$$

Errores en la integración inercial
 Bias de los sensores

- Corrección en lazo cerrado
 - Se realimentan los errores

- Modelo del sistema \Rightarrow Propagación de errores \Rightarrow ECEF



Implementación experimental: Hardware

▪ Sensores inerciales

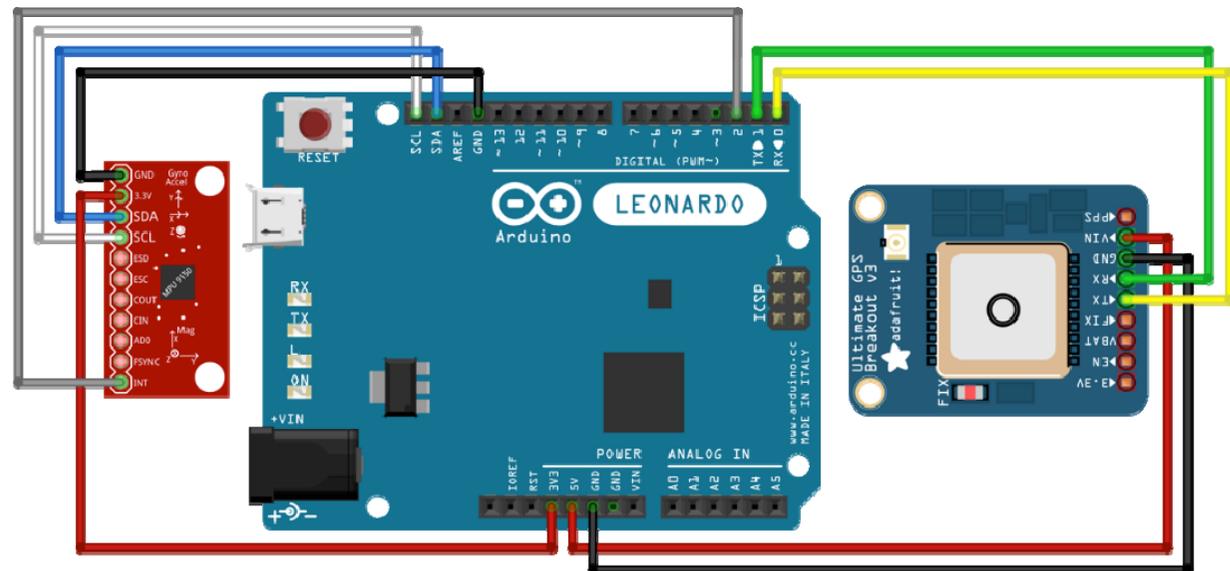
- Invensense MPU-9150
- Giróscopo de 3 ejes
- Acelerómetro de 3 ejes
- Frecuencia de muestreo máx. 200 Hz
- Comunicación vía I²c
- Precio: 30 €

▪ Microcontrolador

- Arduino Leonardo rev3
- 2 puertos serie
- 1 bus I²c
- Precio: 20 €

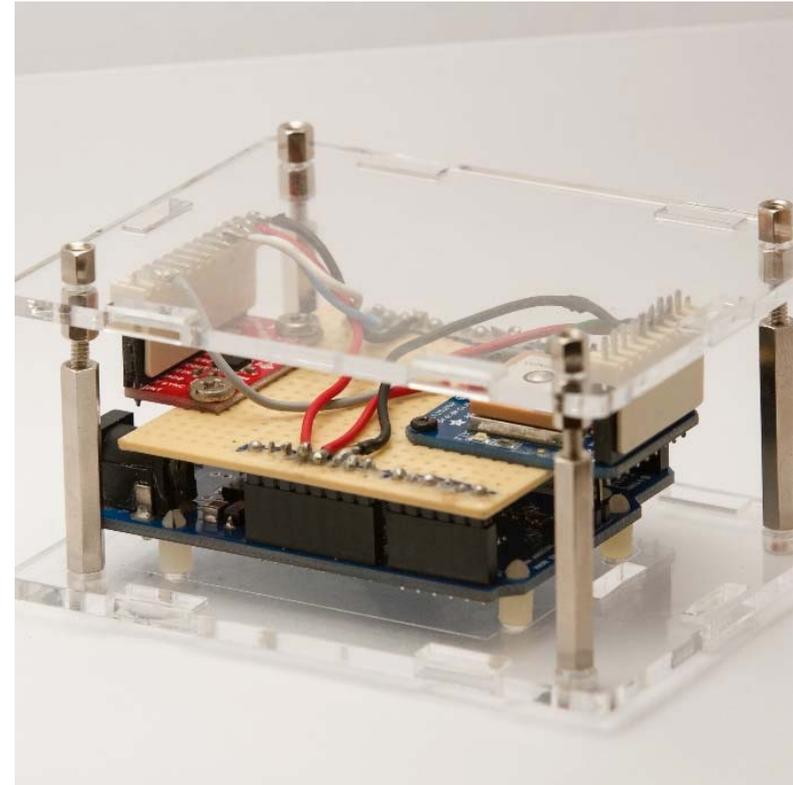
▪ Receptor GPS

- Adafruit GPS Breakout v3
- Precisión del posicionamiento \approx 4 m
- Frecuencia de actualización máx. 10 Hz
- Comunicación vía puerto serie
- Precio: 40 €

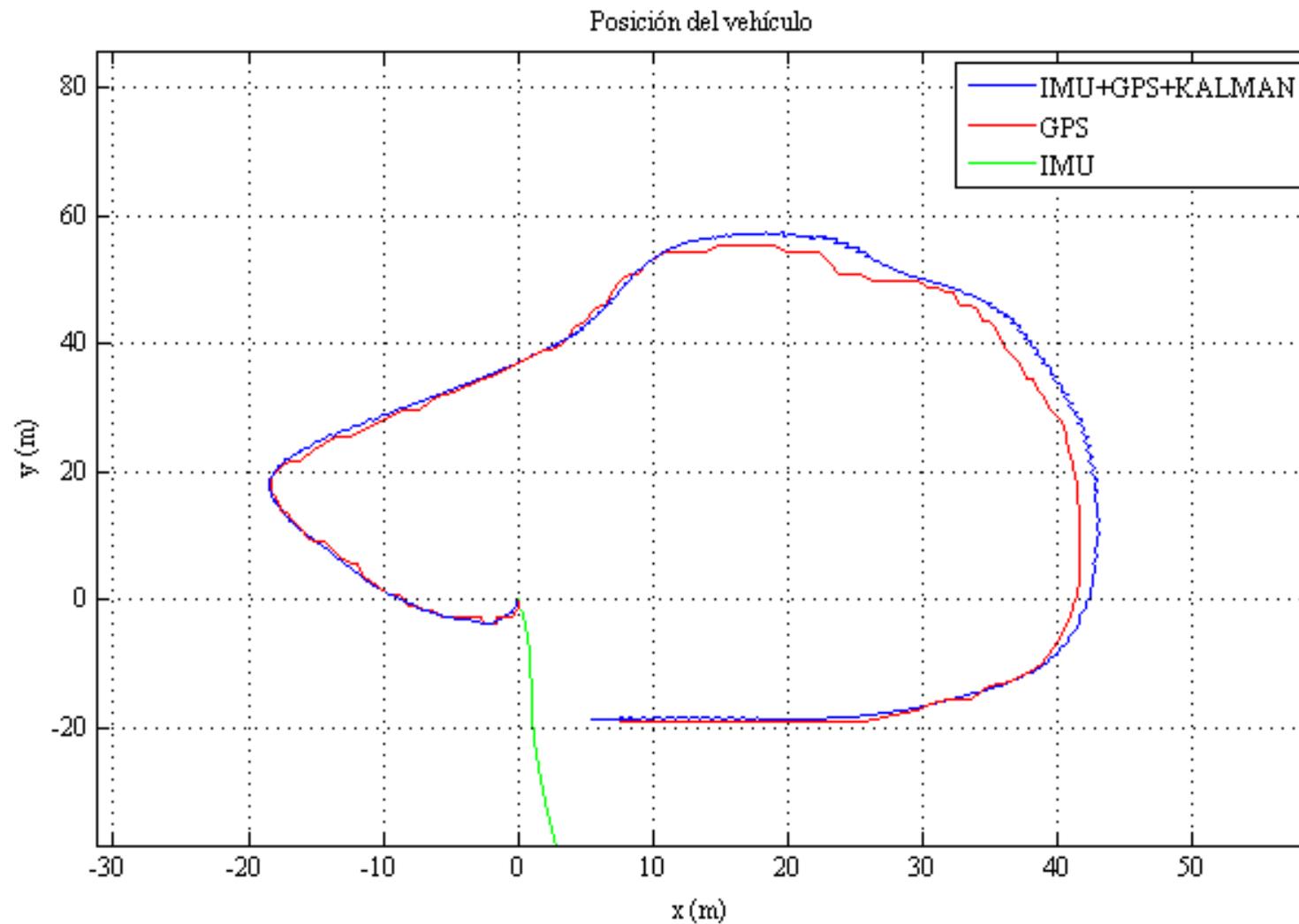


Implementación experimental

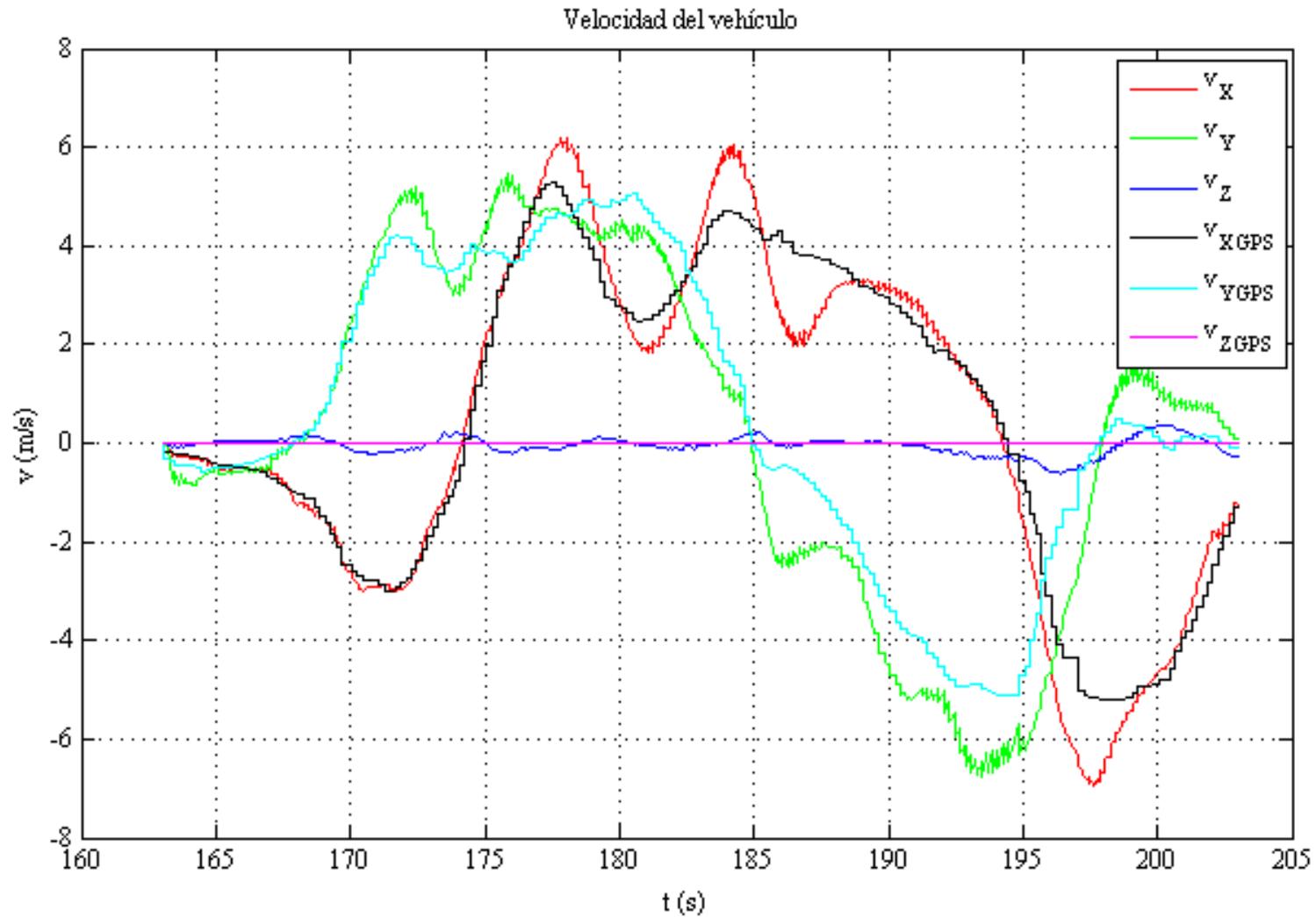
- Elaboración de librerías para los sensores
 - Comunicación mediante protocolo I²c
- Configuración de los dispositivos
 - IMU:
 - Frecuencia de muestreo: 100 Hz
 - Rango de mediciones acelerómetros: ± 4 g
 - Rango de mediciones giróscopo: ± 250 °/s
 - GPS:
 - Frecuencia de actualización: 5 Hz
- Integración en una misma plataforma
- Implementación del algoritmo de integración en Matlab
 - Ajuste de los parámetros del Filtro de Kalman \Rightarrow Estabilidad



Resultados



Resultados



Resultados

	GPS	INS	Sistema integrado
Frecuencia de muestreo	5 Hz	100 Hz	100 Hz
Fiabilidad a largo plazo	Alta	Muy baja	Alta
Precisión en la localización	4 m	-	0.28 m
Precisión en la medición de velocidad	0.3 m/s	-	0.22 m/s
Precisión en la medición de la orientación	-	-	0.1 rad

Conclusiones y futuras mejoras

■ Conclusiones

- Se seleccionaron, programaron y configuraron los sensores inerciales y el receptor GPS.
- Se empleó un filtro de Kalman indirecto, implementado en Matlab, para la integración de las mediciones de los sensores.
- Se desarrolló un algoritmo ejecutable en tiempo real.
- Se obtuvo un dispositivo integrado cuya solución de navegación es más precisa que la dada por los sensores que lo forman por separado.

■ Futuras mejoras

- Empleo de unos sensores inerciales de calidad superior.
- Amortiguación de las vibraciones.
- Aumento del número de componentes del vector de mediciones.
- Comparación de la precisión del sistema integrado con un sistema GPS de precisión.

Trabajo fin de Grado

Integración mediante filtro de Kalman de sensores inerciales y GPS para la estimación de la posición de un vehículo

- Autor:
 - Alejandro Vázquez Fraga
- Tutores:
 - Miguel Ángel Naya Villaverde
 - Emilio Sanjurjo Maroño
- Septiembre, 2014